

# VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

**Fakulta stavební**

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

## ANALÝZA VÝVOJE SESUVU V LOKALITĚ KOZINEC U DOUBRAVY

Diplomová práce

Autor:

Bc. Marek Svárovský

Vedoucí práce:

doc. RNDr. Pavel Pospíšil, Ph.D.

V Ostravě 2019

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Svárovský**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: **Analýza vývoje sesuvu v lokalitě Kozinec u Doubravy**  
**Analysis of Landslide Development in the Locality Kozinec near**  
**Doubrava**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Metodika práce
3. Geologická stavba zájmové oblasti
4. Tvorba 3D inženýrskogeologického modelu zájmové oblasti
5. Zhodnocení inženýrskogeologických charakteristik jednotlivých litologických celků
6. Tvorba 2D geotechnického výpočetního modelu pro hodnocení stability svahu
7. Simulace stability svahu v rovinné úloze
8. Popis geotechnického monitoringu svahové deformace
8. Zhodnocení výsledků modelového řešení s výsledky geotechnického monitoringu
9. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- BAROŇ, I. AND J. KLIMEŠ *Sesuvy, člověk a krajina : sborník referátů a prezentací z odborného semináře konaného ve dnech 16-18. dubna 2003 v rekreačním středisku Myacentrum v Hutisku-Solanci*. Edition ed. Brno: Česká geologická služba, 2003. 1 CD-ROM. p.
- EVANS, S. G. *Landslides from massive rock slope failure*. Edition ed. Dordrecht: Springer, 2006. xiii, 662 s. p. ISBN 1-4020-4035-0.
- EVANS, S. G. AND J. V. DEGRAFF *Catastrophic landslides : effects, occurrence, and mechanisms*. Edition ed. Boulder: <<The >>Geol. Soc. of America, 2002. viii, 411 s. p. ISBN 0-8137-4115-7.
- GENUCHTEN, P. M. B. V. *Movement mechanisms and slide velocity variations of landslides in varved clays in the French Alps = Bewegingsmechanismen en glijnsnelheidsvariatiën van aardverschuivingen in warvenklei in de Franse Alpen*. Edition ed. Amsterdam Utrecht: Koninklijk Nederlandse Aardrijkskundig Genootschap ;Geografisch Instituut Rijksuniversiteit Utrecht, 1989. 156 s. p. ISBN 90-6809-108-5, 90-6266-074-6 0169-4839;.
- MACOUN, J. *Kvartér Ostravska a Moravské brány*. Edition ed. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1965. 419 s., 414 příl. p.
- MATULA, M. *Geológia v územnom plánovaní a výstavbe*. Edition ed. Bratislava: Príroda, 1995. 213 s. p.
- MÍSAŘ, Z. *Geologie ČSSR. I, Český masív*. Edition ed. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983. 333 s. p. ISBN (váz.).
- PAŠEK, J. AND M. MATULA *Inženýrská geologie. I*. Edition ed. Praha: s.n., 1995. 344 s. p.
- PAŠEK, J. AND M. MATULA *Inženýrská geologie. II*. Edition ed. Praha: s.n., 1995. s. 348-610 p.
- SASSA, K. *Progress in landslide science*. Edition ed. Berlin, : Springer, 2007. xxvii, 378 s. p. ISBN 978-3-540-70964-0.

ZÁRUBA, Q. AND V. MENCL *Sesuvy a zabezpečování svahů*. Edition ed. Praha: Academia, 1969. 221 s. p.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Pavel Pospíšil, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2019

Datum odevzdání: 29.11.2019

---

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení:**

- Celou diplomovou práci včetně příloh jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, mou diplomovou práci využít podle (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze této diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence je nutno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užit dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona. - Bylo sjednáno, že užit své dílo – diplomovou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

***V Ostravě dne 25. 11. 2019, Bc. Marek Svárovský***

## **Poděkování:**

Velice děkuji doc. RNDr. Pavlovi Pospíšilovi Ph.D. za odborné vedení, přínosné konzultace a podporu v celém průběhu tvorby mé diplomové práce.

Dále chci poděkovat doc. RNDr. Evě Hrubešové Ph.D. a Ing. Lukáši Ďurišovi Ph.D. za ochotnou pomoc při tvorbě výpočetního modelu a práci se specializovaným softwarem.

Také chci moc poděkovat Ing. Lud'ku Kovářovi Ph.D. a jeho firmě K-GEO s.r.o. za spolupráci a zajištění většiny podkladů.

A v neposlední řadě bych rád vyjádřil vděk všem v mém okolí, kteří se jakýmkoliv způsobem zasadily o úspěšné vytvoření této práce.

## **Anotace:**

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku analýzy chování a sanace svahové nestability Ujala, v oblasti Karvinska. Práce se opírá o nově vytvořené geologické řezy a inženýrskogeologické modely zájmové lokality. K jejich tvorbě byly využity volně dostupné veřejné informační zdroje, podklady firmy K-GEO, s.r.o. a neveřejná data České geologické služby. Pro účely práce byly konstruovány celkem 3 myšlené geologické řezy. Z nich vycházejí upravené inženýrskogeologické modely užívané při výpočtech stability a přetvoření svahu. Pro zhodnocení chování svahové deformace byly hledány veličiny jako jsou deformace svahu, čerpání smykové pevnosti nebo změna pórových tlaků. Výpočty byly realizovány ve specializovaném softwaru silovými metodami i metodou konečných prvků. Použity byly programy Geo5 a Plaxis 2D.

*Klíčová slova: svahová deformace, geologický řez, stabilita svahu*

## **Annotation:**

This work is focused on the analysis of behavior and rehabilitation of slope instability Ujala in the Karviná area. The thesis is based on newly created geological cross sections and engineering geological models of the locality of interest. For their creation were used freely available public information sources, documents of the company K-GEO, Ltd. and non-public data of the Czech Geological Survey. A total of 3 imaginary geological cross sections were constructed for the thesis. Based on these cross sections are modified engineering geological models used in the calculation of stability and slope deformation. To evaluate the slope deformation behavior, quantities such as slope deformation, shear strength pumping or change in pore pressures were sought. The calculations were carried out in specialized software by force methods and finite element methods. Programs Geo5 and Plaxis 2D were used.

*Keywords: slope deformation, geological profile, slope stability*

## **Seznam zkratek:**

HPV	Hladina podzemní vody
DMT	Digitální model terénu
Fs	Stupeň stability
ČGS	Česká geologická služba
IG model	Inženýrskogeologický model
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
MKP	Metoda konečných prvků
p.t.	Pod terénem
m.n.m.	„Metrů nad mořem“
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav

## Obsah:

1. Úvod .....	10
1.1. Účel analýzy sesuvu v lokalitě Kozinec u Doubravy.....	10
1.2. Cíle analýzy.....	14
1.3. Klasifikace svahových pohybů zájmového svahu.....	15
2. Metodika práce .....	16
2.1. Sběr základních informací o lokalitě.....	17
2.2. Zajištění profilů vrtné prozkoumanosti .....	17
2.3. Tvorba geologického modelu zájmové lokality .....	18
2.4. Určení HPV pro různé fáze výpočtu .....	19
2.5. Stabilitní výpočet metodou mezní rovnováhy.....	20
2.6. Výpočet stability metodou konečných prvků.....	21
3. Přírodní poměry oblasti .....	23
3.1. Poloha a popis lokality .....	23
3.2. Geomorfologické poměry oblasti.....	23
3.3. Geologické poměry oblasti .....	24
3.4. Inženýrskogeologické podmínky na lokalitě .....	24
3.5. Hydrogeologické podmínky na lokalitě .....	26
4. Tvorba modelové situace.....	27
4.1. Tvorba 3D inženýrskogeologického modelu oblasti.....	27
4.2. Tvorba 2D geotechnického výpočetního modelu svahu .....	27
4.2.1. Rovinný geotechnický model č. 1 .....	30
4.2.2. Rovinný geotechnický model č. 2 .....	31
4.2.3. Rovinný geotechnický model č. 3 .....	32
4.3. Inženýrskogeologické charakteristiky litologických celků .....	33
5. Modelování v prostředí softwaru Geo5 .....	38
5.1. Parametry a předpoklady výpočtu rovinné úlohy v programu GEO-5 .....	38



5.2.	Výsledky analýzy stability svahu.....	39
5.3.	Zhodnocení výsledků .....	42
6.	Modelování v prostředí softwaru Plaxis 2D .....	42
6.1.	Parametry a předpoklady výpočtu rovinné úlohy .....	44
6.2.	Výsledky analýzy napětí a přetvoření horninového masívu .....	44
6.2.1.	Podrobná analýza výsledků na profilu č. 1 .....	46
6.2.2.	Podrobná analýza výsledků na profilu č. 2.....	47
6.2.3.	Podrobná analýza výsledků na profilu č. 3.....	48
6.3.	Zhodnocení výsledků .....	50
7.	Srovnání výsledků řešení silovými metodami a MKP .....	50
7.1.	Zhodnocení řešení metodou mezní rovnováhy .....	51
7.2.	Zhodnocení řešení MKP .....	51
8.	Srovnání výsledků s pozorováním monitoringu.....	52
9.	Závěr.....	53
10.	Seznam obrázků.....	56
11.	Seznam tabulek .....	57
12.	Seznam příloh .....	57
13.	Seznam literatury .....	58
14.	Seznam internetových zdrojů.....	60
15.	Seznam použitého softwaru .....	60

# 1. Úvod

## 1.1. Účel analýzy sesuvu v lokalitě Kozinec u Doubravy

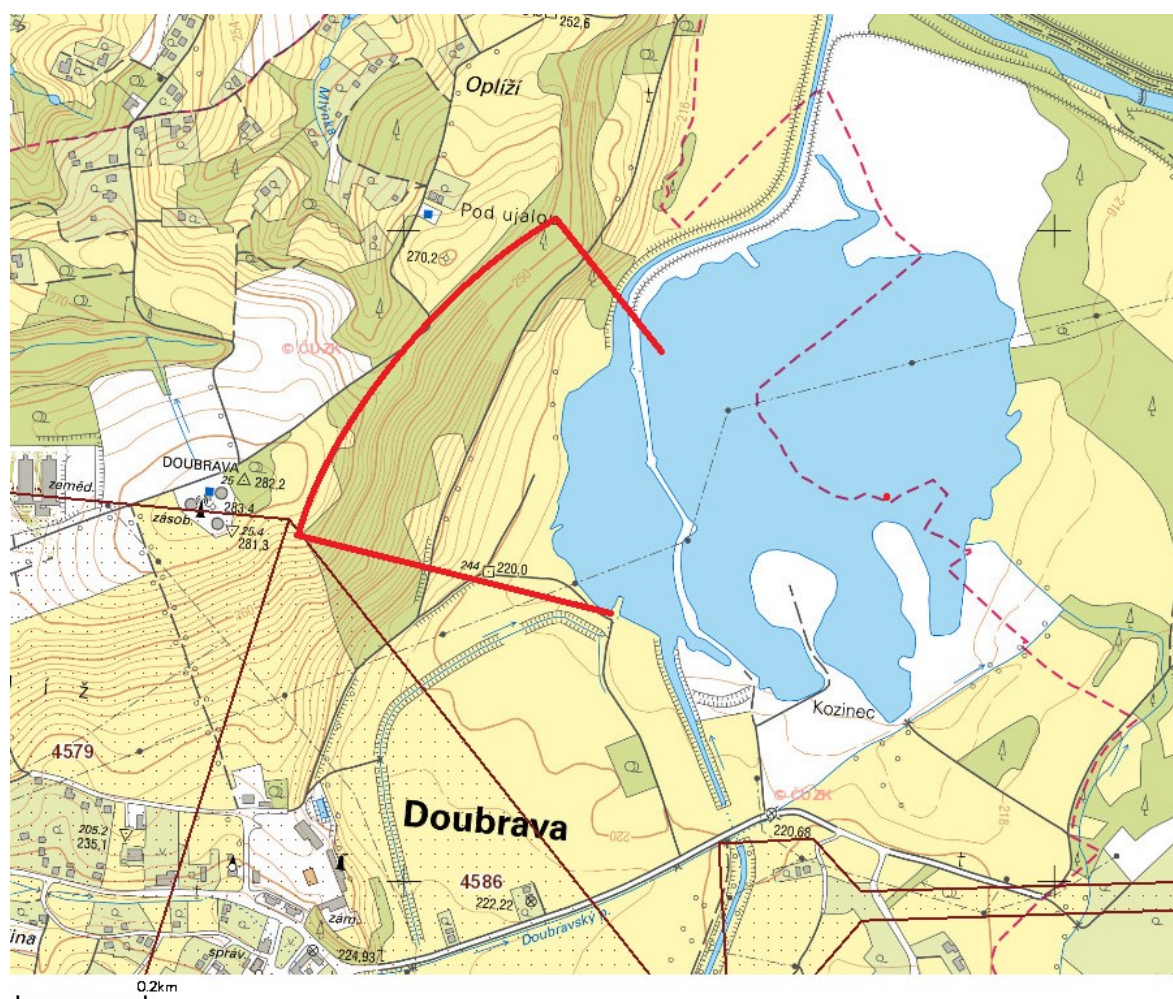
Svahová fronta Ujala se nachází v blízkosti obce Doubrava v Moravskoslezském kraji. Je tvořena východně orientovanými svahy, na západním břehu zátopy Kozinec. Jde o rozsáhlou potenciální svahovou nestabilitu. Rozsáhlé části svahu však již vykazují známky aktivních svahových pohybů. Tyto deformace jsou přirozenými sesuvy, způsobenými přírodními vlivy a geologickou stavbou území. Aktivními faktory podněcující vznik sesuvu jsou v tomto případě atmosférické srážky a možné nasycení svahu vodou ze zátopy. Pasivním faktorem je pak geologická stavba oblasti, která je příčinnou potenciální nestability celého svahu. Jde o mladou svahovou nestabilitu, jejíž stáří je odhadováno na desítky let. Z tohoto důvodu se nabízí souvislost mezi projevy důlní činnosti a svahovými pohyby v zájmové oblasti.



Obr. 1: Pohled na zájmovou lokalitu v letech 2012 (vlevo) a 2019 (vpravo) zdroj: Mapy.cz, upraveno

V minulosti totiž v blízkosti zájmové oblasti probíhala intenzivní hlubinná těžba černého uhlí. Svah samotný však není přímo poddolován, podle mapových podkladů ČGS (obr. 2) se nejbližší důlní dílo nachází na jihozápadním okraji zájmové oblasti. Jako důsledek této těžby se v posledních letech, severně od obce Doubrava, začala tvořit rozsáhlá poklesová kotlina. Z obrázku č. 1 je zřejmý rozsah a důsledky poklesu terénu. V roce 2019, dle srovnání veřejně dostupných mapových podkladů, může dosahovat pokles terénu až 10 m. Rozvoj poklesové kotliny však v současnosti stále pokračuje a velikost deformací na

povrchu se proto stále mění. Vzhledem k rovinatému rázu krajiny v oblasti bezprostředně pod inkriminovaným svahem se na toku Karvinského potoka vytvořila zátoka o značné hloubce. (Některé převzaté hodnoty hovoří o maximální hloubce až 8 m.)



Obr. 2: Mapa poddolování a důlních děl v blízkosti zájmového svahu (uvnitř červené oblasti), Zdroj: Česká geologická služba, upraveno

Svahové nestability jsou přitom velmi citlivé na přítomnost podzemní vody. Proto je předkládaná analýza zaměřena především na vliv přítomnosti podzemní vody, případně změny výšky hladiny podzemní vody (dále jen „HPV“) v kombinaci s oslabením svahu na smykové ploše. Tyto proměnné byly vybrány jako dominantní, neboť z praxe je známo, že voda a pohyb na kluzné ploše má největší vliv na smykovou pevnost zemin (zvláště pak jemnozrnných zemin – jílu) [1] [2]. Smyková pevnost zemin je přitom jedním z nejdůležitějších parametrů při řešení stability svahu. Naproti tomu aktivace sesuvu změnou geomorfologie terénu se jeví jako nepravděpodobná. To je dáno právě velkou plochou svahové deformace, oproti velikosti poklesu terénu. Rozměry svahu v půdoryse se pohybují ve stovkách metrů a délka rizikového svahu dokonce přesahuje kilometrovou vzdálenost. Na

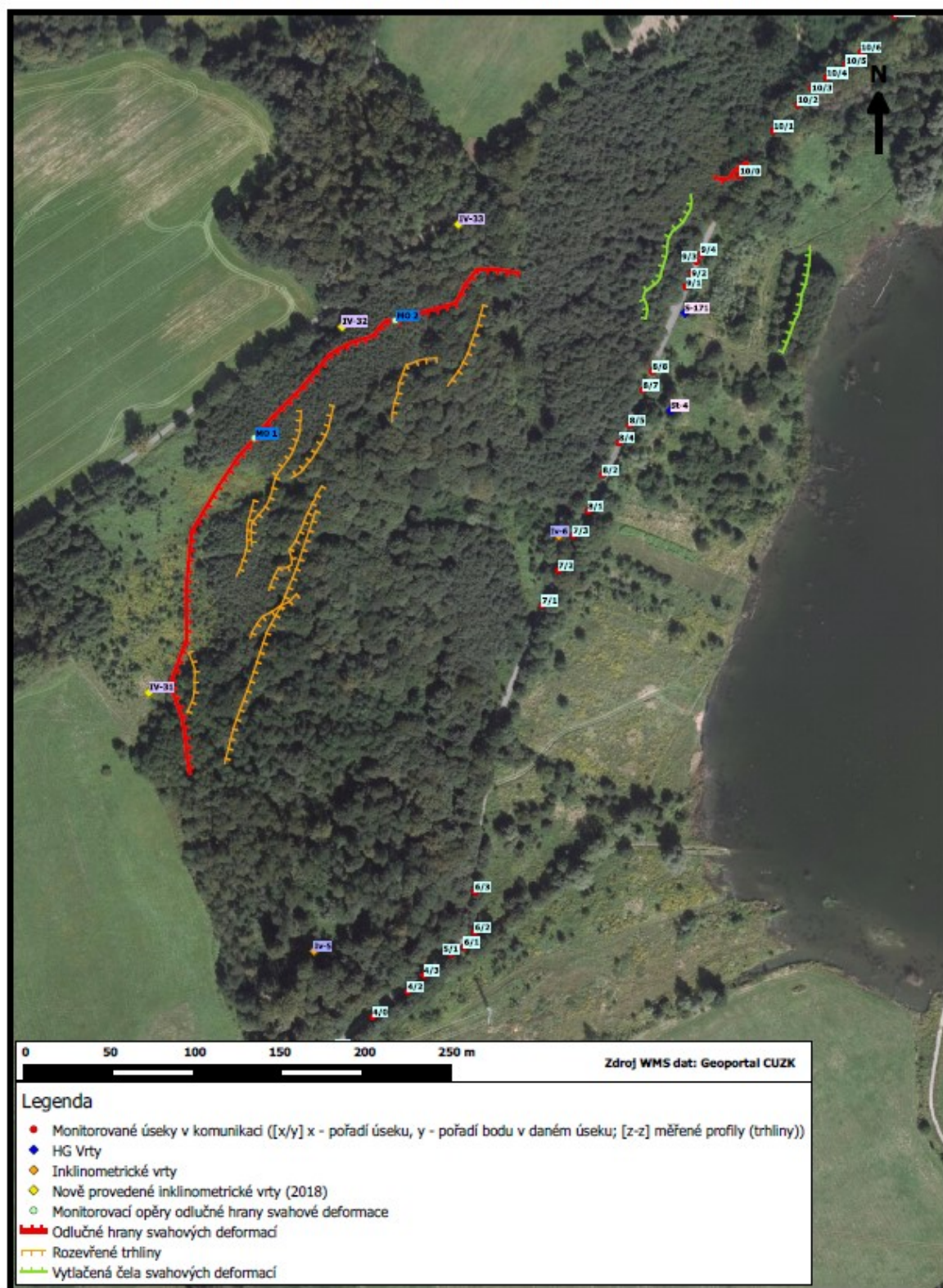
výšku však svah měří v nejvyšším místě „pouze“ asi 70 m. Změna sklonu svahu tedy dosahuje maximálně jednoho úhlového stupně. Větší vliv tak může mít změna napětového stavu jílových vrstev masívu. S tím taky souvisí již zdokumentovaný rozvoj tahových trhlin v horní části svahu, viz. [3]. Jejich přítomnost může být též faktorem ovlivňujícím stabilitu svahu, neboť jsou infiltrační oblastí pro dešťovou vodu. Tím může docházet k saturaci zemin v horních částech svahu.

Dosavadní zprávy a posudky se zabývají pouze stávajícím stavem a vyhodnocováním probíhajícího monitoringu v zájmové oblasti. Stávající monitoring zahrnuje inklinometrická měření, extenzometrická měření, měření HPV, rekognoskaci oblasti a sledování projevů sesuvu na pozemních komunikacích. To vše opakovaně s četností přibližně 2x do roka [4]. Obrázek č. 3 pak přibližuje komplexnost realizovaného monitoringu. Tato data a zprávy z monitoringu byly též částečně využity při vypracovávání této práce. Jako podklad při tvorbě modelu byly využity laboratorně zjištěné hodnoty vlastností zemin.

Účelem této práce je tedy objasnit chování a procesy probíhající v zájmové lokalitě a na rizikovém svahu. Využít k tomu jak známé informace, tak zpracování a vyhodnocení nových přínosných informací. Diskutovat a zahrnout výsledky tohoto řešení do závěrů již publikovaných zpráv a monitoringu. A ve výsledku tak přispět ke kvalitnímu vyšetření a sanaci zmíněné svahové nestability.



### Situace monitorovaných objektů a vybraných archivních sond



Obr. 3: Výkres realizovaného monitoringu svahové nestability, převzato ze zprávy K-GEO, s.r.o., upraveno

## 1.2. Cíle analýzy

Práce se zabývá mírou vlivu změny výšky HPV na stabilitu rizikového svahu. Prvním cílem práce je vytvořit použitelný model svahu, který by co nejlépe odpovídal svou geologickou stavbou, příslušnými vlastnostmi litologických celků a morfologií realitě. Druhým cílem této práce je potvrzení nestability takového svahu při saturaci vodou a oslabení podloží reziduálními parametry. Závěrečným cílem pak je ověření dostatečného zvýšení stupně stability  $F_s$  při použití sanačních opatření. Cílem modelovaných situací je věrně posoudit geomorfologické, litologické, hydrogeologické a stabilitní poměry svahu. Modelové situace přitom vycházejí z reálného, probíhajícího monitoringu. Proto je proces modelování rozčleněn do několika situací, které jsou níže rozepsány spolu s přehledem jednotlivých modelových situací:

Pro první fázi modelování je uvažován svah se současnou morfologií, zjištěnou dle 5 DMT, tj. ovlivněný poklesem terénu pod svahem. Geologická stavba vychází z údajů vrtné prozkoumanosti, tj. dokumentace vrtných prací. Model nepočítá se zvýšenou HPV ani se snížením parametrů podloží svahovými pohyby. Situace též nepočítá se sanačními opatřeními. Tento stav bude sloužit pouze pro účely gravitačního sednutí modelu v MKP, jež je nutné pro další postup modelování. Stupeň stability při této situaci proto nezjišťují.

Následující fází je modelování situace se zvýšenou HPV. Reliéf povrchu tohoto modelu je založen na kombinaci dat z 5 DMT, profilů vrtů a známých i odhadnutých hodnotách poklesů. Tato situace odpovídá době aktivace sesuvu, před započítáním opatření na zvýšení stability. Při této fázi proto není počítáno s žádnými ze sanačních opatření. Smyková pevnost části podloží je však výrazně snížena. Tyto reziduální parametry mají za cíl zohlednit oslabení vrstev v důsledku pohybu masívu. Výsledky z této situace by měly prokázat snížení stability svahu. Očekávána je hodnota stupně stability v blízkosti 1,0, jež je hraniční při ztrátě stability. Výpočet metodou konečných prvků by měl odhalit značné čerpání smykové pevnosti, přítomnost plastických bodů a charakteristické plastické přetváření svahu v oblasti oslabení.

Ve třetí fázi je model doplněn o přítěžovací lavici, avšak bez odvodnění pomocí drenů z hrubozrnné zeminy (lomového kameniva). Tato situace je spolu s následující fází modelována kvůli prokázání vlivu HPV na stabilitu svahu. Vzhledem k předpokládanému nasycení a oslabení zemin v oblasti smykové plochy se neočekává dostatečný nárůst stupně stability, omezení napětí a deformací svahu.

Poslední fází výpočtu je situace odvodnění svahu pod přítěžovací lavicí, kterého je ve skutečnosti dosaženo odvodňujícími drény. Vzhledem k jejich povaze však v modelu nejsou zohledněny jako samostatná vrstva. Geometrie přítěžovací lavice přitom zůstává totožná s předchozí fází výpočtu. Model počítá s maximálním možným snížením HPV, tzn. v propustných zeminách až na úroveň hladiny zátopy. Spolu se zvýšením smykové pevnosti zemin je očekáváno zvýšení i stupně stability. Požadovaná hodnota stupně stability je zpravidla alespoň 1,3. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na bezpečnou rezervu, avšak ne příliš vysoká, z důvodu zbytečného předimenzování. Modelováním rovinných úloh navíc obvykle zjišťujeme mírně nižší stabilitu svahu než ve skutečnosti. Tento rozdíl je způsoben absencí stabilních okrajů řešeného svahu [5]. Dosažená hodnota bude zřejmě závislá na schopnosti dostatečného snížení HPV. V případě výpočtu pomocí MKP by mělo dojít ke snížení čerpání smykové pevnosti, úbytku plastických oblastí a s tím související omezení deformací na svahu.

### **Shrnutí:**

Cílem modelování všech výše zmíněných situací je:

1. Vytvořit realistický model původně nestabilního svahu
2. Prokázat aktivaci sesuvu při zvýšené HPV a reziduálních parametrech
3. Ověřit účinnost realizovaných sanačních opatření
4. Závěrem zhodnotit a srovnat použité metody

### **1.3. Klasifikace svahových pohybů zájmového svahu**

Celý zájmový svah je dle České geologické služby (dále jen ČGS) klasifikován jako potenciální sesuvné území. Některé části jsou pak již klasifikovány jako aktivní sesuv. Zatímco použití termínu „potenciální sesuv“ je zde v pořádku, označení „aktivní sesuv“ je v tomto případě spíše „odborným slangem“. Zde použité označení „sesuv“ totiž není v souladu s projevy běžného sesuvu a může tedy být mylně vyloženo, zejména nezainteresovanými lidmi. Je to dáno tím, že oblast v současnosti vykazuje chování typické spíše pro creepové pohyby. I přes sanační opatření a minimalizaci rizika, však stále nelze vyloučit, že v budoucnu k náhlému pohybu, tudíž sesuvu, dojde.

Největší rozdíl spočívá v rychlosti pohybu, který u sesuvu bývá v rozmezí centimetrů za měsíc až do kilometrů za hodinu [6] [7]. Většina lidí si přitom jako sesuv představuje pohyb o rychlosti na horní straně rozpětí. Jeho projevy tak mohou být makroskopicky pozorovatelné i v reálném čase. Dominantní směr tohoto pohybu je přitom rovnoběžný se svahem. Aktivní svahové pohyby na lokalitě Kozinec u Doubravy jsou však řádově pomalejší a liší se i převládajícím směrem pohybu svahu. Naměřené hodnoty udávají rychlost pohybů na smykové ploše pouze v řádu jednotek milimetrů za rok. Řádově větší (ne nutně rychlejší) pohyby byly zaznamenány pouze v blízkosti odlučné hrany svahového pohybu. Zde jsou jasně patrné dominantní vertikální poklesy terénu o desítky centimetrů. Toto zjištění sice poukazuje na křehké porušení masívu typické pro sesuv, není však uspokojivě zdokumentováno časové období vývoje této ruptury.

Dle všeobecně akceptovaného systému zatřídění svahových pohybů (blíže rozebraném např. zde [3]) se tak lépe hodí označení ploužení neboli „creep“. Tomuto označení též vyhovuje tvrzení, že jde o dlouhodobé přetváření masívu, viditelné v ostatních částech svahu. Pohyb navíc může probíhat na ne zcela konkrétní smykové ploše, nejen na styku různých vrstev podloží. Sesuvem se však svahová nestabilita Ujaly zřejmě stává ve výjimečných případech, kdy klimatické vlivy dostatečně sníží stabilitu svahu. Při těchto příležitostech mohla vzniknout většina křehkých poruch na svahu.

## 2. Metodika práce

V duchu oboru inženýrské geologie, kterému je věnována např. publikace [7], bylo k celé práci přistupováno systematicky. Pro správnou analýzu chování svahového pohybu v oblasti Kozince bylo potřeba využít široké spektrum zdrojů. Použity jsou obecné informace o geologické minulosti oblasti a antropogenních vlivech. Dále byla využita data popisující současné geomorfologické poměry terénu, hlavně pak reliéf terénu v trase modelovaných profilů. Detailní podklady zahrnují vrtnou prozkoumanost, laboratorní protokoly a zprávy komplexního monitoringu, souhrnně popisující tzv. inženýrskogeologické poměry.

Dalším nutným krokem byla pečlivá a správná interpretace výše získaných údajů. Hlavní část této fáze řešení byla tvorba geologického modelu zájmové oblasti. Konkrétně jde o tři geologické profily vedené po spádnicí tělesem aktivní svahové nestability. Tyto tři řezy budou následně vyhodnoceny variantním výpočtem ve specializovaném softwaru.



Z dostupných programů na školních PC jsem vybral následující: GEO5 – modul Stabilita svahu a Plaxis 2D. Průběh výpočtů je následující: původní stav svahu, saturace a oslabení svahu, sanace svahu (2 situace).

Posledním krokem je analýza zjištěných výsledů. Výsledky modelování jsou zde korelovány a srovnány s naměřenými hodnotami během monitoringu. Výstupem je ucelená představa o chování potenciálního sesuvu zahrnující předpokládanou příčinu destabilizace svahu, míru nestability, která je vyjádřena stupněm  $F_s$  a účinnost sanace svahu přítěžovací lavicí a odvodněním.

## 2.1. Sběr základních informací o lokalitě

S lokalitou jsem se dobře seznámil jak při tvorbě mé bakalářské práce, tak při práci ve firmě K-GEO s.r.o. Informace o umístění a povaze terénu na řešené lokalitě jsou veřejně dostupné na mapových portálech. Data o pozemcích, parcelách, nemovitostech pak lze dohledat online na stránkách Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (dále ČÚZK). Pro snazší orientaci a dohledání lokality je v textu též zmínka o pozici na mapových listech a katastrálních územích.

Popis lokality je založen na vlastní zkušenosti během rekognoskace svahu a opakovaných kontrolních pochůzkách na lokalitě během roku 2018. Dobrou představu o podmínkách na svahu rovněž podávají letecké mapové snímky.

## 2.2. Zajištění profilů vrtné prozkoumanosti

Pro vytvoření geologického modelu zájmové lokality jsou nezbytná data v podobě dokumentace vrtných jader. Většina vrtné dokumentace mi poskytla firma K-GEO s.r.o., která na lokalitě provozuje komplexní IG monitoring svahové nestability. K zajištění stávajícího monitoringu bylo potřeba realizovat některé nové vrty. Materiály k těmto vrtům jsou stále ve vlastnictví společnosti. Jejich zapůjčení proto bylo řešeno dohodou mezi mnou jako autorem práce a zástupcem K-GEO s.r.o., Ing. Luděk Kovařem, Ph.D. Vzhledem k různorodé minulosti oblasti, se v blízkosti lokality nachází také poměrně hodně starších IG vrtů dostupných v databázi České geologické služby (dále jen ČGS). Tyto vrty byly použity jako doplňkový zdroj dat k ověření a zpřesnění litologické stavby území. Tato dodatečná vrtná dokumentace je dostupná pouze pro osobní nahlížení. Jedním z kroků při

sběru dat proto byla návštěva badatelný ČGS v Praze. Celkově je v oblasti k dispozici 25 vrtů použitelných při řešení geologické stavby oblasti ve 3D. Z toho 12 vrtů bylo nakonec skutečně použito pro tvorbu 2D profilů. Situace všech vrtů a geologických řezů je znázorněna na obrázku č. 4. Množství vrtů použitých v jednotlivých geologických řezech je tedy následující:

- Profil č.1 – 4 vrtů
- Profil č.2 – 5 vrtů
- Profil č.3 – 3 vrtů



Obr. 4: Poloha všech vrtů na podkladu leteckých map z r. 2018, červeně – zamýšlené geologické řezy, bez měřítka

### 2.3. Tvorba geologického modelu zájmové lokality

Inženýrskogeologický model (dále jen IG model) zájmové oblasti je při zkoumání chování či výpočtech stability svahu nejdůležitější část práce. Podoba výsledného modelu vychází ze správné interpretace často diskrétních dat z vrtné prozkoumanosti a monitoringu. Méně často jsou k dispozici i data z ostatních metod průzkumu. Z tohoto důvodu je tvorba IG modelu zřejmě nejnáročnější a nejdelší fází při zpracování této práce (nejinak tomu často bývá i v praxi). Nejdříve byly upřesněny nároky na kvalitu a komplexnost dat zahrnutých do tvorby modelu. V tomto případě jde primárně o zaměření vrtů v době vrtání, geologický profil vybraných vrtů, profil terénu dle 5. DMT a režim HPV. Informace o hodnotách

poklesů pocházejí z dokumentace monitoringu K-GEO s.r.o., přičemž při tvorbě modelu byla tato data extrapolována. Dobrou představu o skutečných hodnotách poklesů též obstaraly rozdíly v původním zaměření historických vrtů a současná nadmořská výška dle 5. DMT. První 3D geologický model oblasti byl vytvořen pouze pro snazší orientaci a přehlednost dat. Nemá vysokou vypovídající hodnotu a největší jeho výhodou bylo následné ulehčení tvorby 2D inženýrskogeologických modelů (řezů). Konečná podoba 2D inženýrskogeologických řezů zobrazuje přesnou morfologii terénu s přesností v desítkách cm. Dále bere v úvahu změnu HPV v různých výpočtových situacích a konstrukci přítěžovací lavice. Umístění geologických řezů a jejich orientace byla volena s ohledem na vzdálenost vrtů co nejbližší roviny profilu.

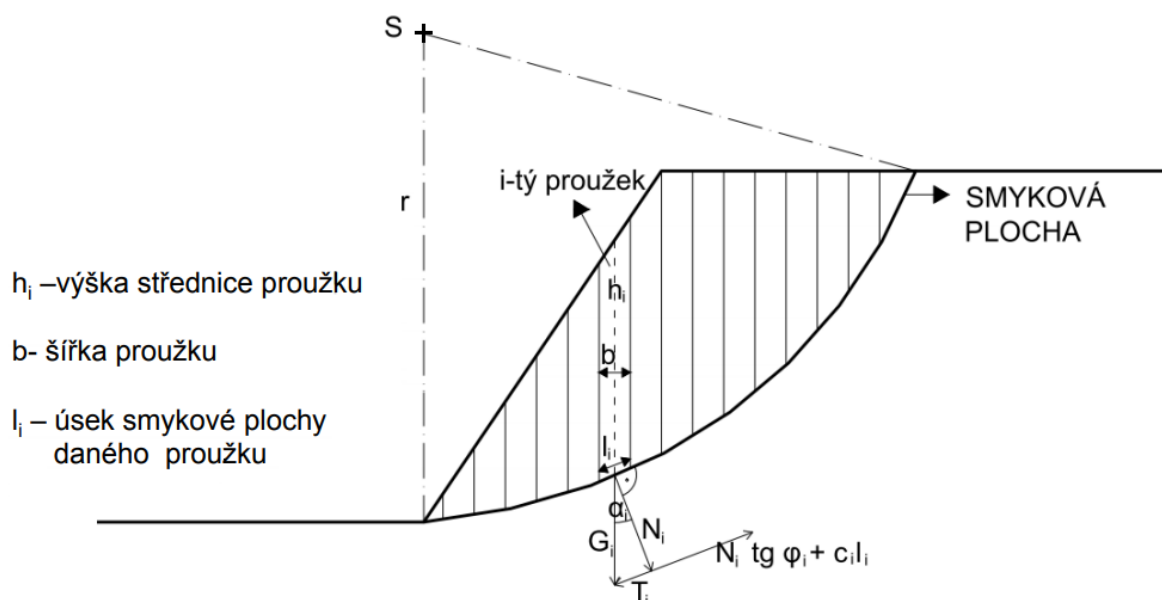
## 2.4. Určení HPV pro různé fáze výpočtu

Hladina podzemní vody významně ovlivňuje stabilitu svahu, proto byla tomuto bodu věnována zvýšená pozornost. Během interpretace dat a tvorby IG modelu však bylo zjištěno že jak informace o aktuálních stavech, tak režimu HPV jsou nedostačující. Problém spočívá ve skutečnosti, že během monitoringu byly budovány především dva typy průzkumných vrtů – IG a HG. Inženýrskogeologický model, jak název napovídá, je založen na informacích z vrtné dokumentace IG vrtů. Pouze v menšině těchto vrtů však byla během vrtných prací ověřena přítomnost HPV a jen v minimu z nich je měřena průběžně. HG monitoring naproti tomu sice poskytuje přesné údaje o stavech HPV, ovšem ale v jiných objektech vrtů a tedy lokacích. Pro zanesení stavů HPV do IG modelu proto bylo potřeba přikročit k poměrně rozsáhlé extrapolaci dat. Protože je tento krok poměrně složitý a nese s sebou značná rizika, byl důsledně konzultován s vedoucím práce. Materiály použité při tvorbě těchto modelů navíc obsahují pouze data do konce roku 2018, tedy přibližně po období provedení sanace. Odhad stavu HPV v ostatních fázích výpočtu je pak pouze teoretická saturace svahu, založená na logických, racionálních argumentech a okolnostech. Výsledkem tohoto zobecnění je bohužel výrazná nejistota, co se týče saturace svahu vodou. IG model odpovídající druhé fázi výpočtu (zvýšená hladina podzemní vody před sanací) proto přináší nejrealističtější podobu svahu s nejpravděpodobnější HPV.

## 2.5. Stabilitní výpočet metodou mezní rovnováhy

Z praktických i časových důvodů je jako první způsob výpočtu stability řešeného svahu zvolena metoda mezní rovnováhy. Oproti výpočtům mechaniky kontinua jako např. metoda konečných prvků (dále jen MKP) je poměrně jednodušší a pracuje s menším množstvím proměnných, které lze zjistit základním laboratorním šetřením. Potřebné materiálové vlastnosti jsou objemová tíha ( $\gamma$ ), úhel vnitřního tření ( $\varphi$ ), soudržnost ( $c$ ), objemová tíha saturované zeminy ( $\gamma_{\text{sat}}$ ), nebo pórovitost ( $n$ ). Všechny tyto veličiny jsou součástí zpráv a dokumentace monitoringu K-GEO s.r.o. Jedinou překážkou tedy byla jejich analýza a určení jedné hodnoty každé veličiny reprezentující celý litologický celek. Vzhledem k poměrně malému souboru dat z laboratorního zhodnocení v jednotlivých profilech byly tyto charakteristiky vypočteny jako aritmetický průměr, který byl následně upraven odborným odhadem. Tento odhad spočíval především ve zmenšení vlivu zřetelně vyčnívajících hodnot. Charakteristiky zemin, které nebyly podrobeny laboratornímu rozboru byly získány z dnes již neplatné normy ČSN 73 1001 a odečtem z publikace Mechanika zemin Inženýrská geologie a Hydrogeologie v praxi. V přílohách normy 73 1001 i zmíněné publikace jsou totiž rozebrány charakteristiky nejčastějších druhů zemin v ČR, podložené kvantitativními daty.

Samotný výpočet je realizován v softwaru Geo5 pomocí modulu „Stabilita svahu“. Ten pracuje na principu proužkových metod výpočtu stability – viz obr. č. 5. Program porovnává aktivní síly od tíhy proužku zeminy s pasivními silami od tření a koheze na smykové ploše. Předpokládá se při tom ostře vymezená smyková plocha, ohraničující materiál sesuvu. Výsledek může být číslo  $F_s$  vyjadřující poměr aktivních a pasivních sil, nebo v procentech využití stability. V prvotním nastavení lze nastavit výpočet dle daných norem i upravit součinitele, dále lze vybrat i konkrétní metody výpočtu. Ty se liší tvarem smykové plochy, uvažováním sil mezi proužky i využitím součinitelů. Všechny metody požadují zadat předdefinovanou smykovou plochu. Výpočtem a optimalizací následně nalezneme její kritickou polohu, a tedy i nejméně stabilní situaci svahu. Je však třeba brát v úvahu že některé metody výpočtu splňují pouze některé z požadovaných podmínek rovnováhy na svahu. Ty by ideálně měli být splněny na proužku i na celém tělese svahu. Zvláště jednoduché metody jako např. K. E. Pettersona a A. W. Bishopa však tyto podmínky v rámci zjednodušení vynechávají a pracují pouze s rovnováhou tělesa svahu jako celku. Příkladem komplexnější metody výpočtu, který počítá i se silami mezi proužky je např. N. Janbu.



Obr. 5: Princip proužkových metod (zde Pettersonova metoda), převzato z materiálů Geotechnici.cz, upraveno

## 2.6. Výpočet stability metodou konečných prvků

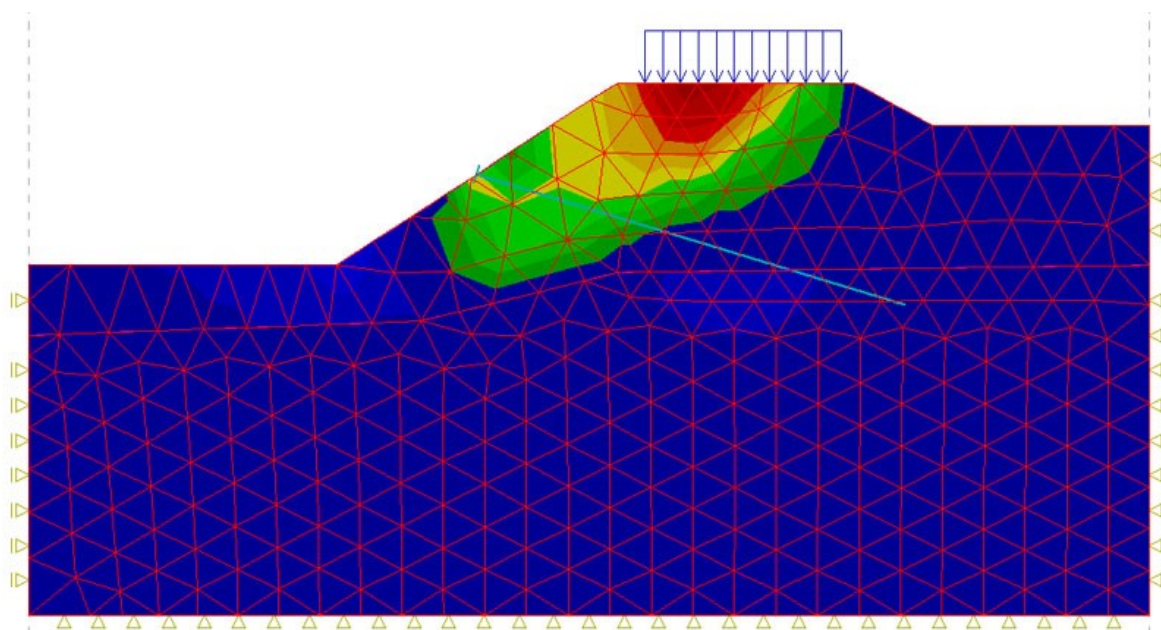
Druhým způsobem výpočtu je aplikace metody konečných prvků MKP, nebo též FEM (z ang. Finite element method). Jde o metodu řešení mechaniky kontinua, která spočívá v řešení konečného počtu neznámých parametrů na konečném množství elementů. Aby i tyto oddělené prvky mohly nahrazovat spojitou oblast, jsou spolu spojeny uzlovými body, na nichž dochází k přenosům hledaných veličin. Výhodou této metody je možnost zjištění deformací, čerpání smykové pevnosti nebo napětí v libovolném bodě masivu. Z toho též vyplývá že se jedná o deformační metodu, vyžadující odpovídající počítačové vybavení. Výpočet je též náročnější na vstupní veličiny, které oproti metodě mezní rovnováhy zahrnují i deformační charakteristiky materiálu. V případě řešení rovinné úlohy jsou hlavními charakteristikami moduly pružnosti ( $E_{oed}$ ), nebo ( $E_{def}$ ) a Poissonovo číslo ( $\nu$ ). Oba moduly pružnosti lze ze znalosti Poissonova čísla mezi sebou dopočítat podle potřeby softwaru. V případě řešení složitějších úloh je potřeba znát další charakteristiky jako např. smykový modul pružnosti ( $G$ ), který si software též dopočítává. Dále je potřeba zadat hydraulické vlastnosti prostředí z důvodu přítomnosti a změny HPV.

Výpočet je proveden v softwaru Plaxis, který je na řešení tohoto typu úloh velmi vhodný. V prvotním nastavení umožňuje výběr výpočtu axisymetrického i rovinného modelu s různými charakteristikami elementů. Na výběr je z 6 - bodových prvků, které dobře obstojí v řešení pouze deformací, nebo 15 - bodových prvků, jež jsou vhodnější na řešení stabilitních úloh. Možné je i vlastní nastavení hustoty sítě pro detailnější výpočet. Program,

jak bylo zmíněno, bere v úvahu více charakteristik zemin, okrajové podmínky i různé materiálové modely. Např.: lineárně – pružný, Mohr – Coulombův, model se zpevněním či skalní s trhlinami atd... Uživatel si navíc v případě potřeby může definovat vlastní model chování zemin. Před samotným výpočtem je dále třeba zohlednit okrajové podmínky, jež zajišťují „upnutí“ modelu v nastavených mezích. I zde existuje několik variant lišících se použitím. Základní okrajové podmínky jsou:

- Úplné upnutí (Fully fixed), upnutý element se nemůže pohnout
- Horizontální / vertikální upnutí (Horizontally / Vertically fixed), povolen pohyb pouze jedním směrem vůči hranici modelu
- Normálové upnutí (Normally fixed), element se může pouze vzdalovat / přibližovat okraji
- Volná hranice (Free), elementu není bráněno v pohybu

Před hlavním výpočtem je navíc potřeba zjistit počáteční geostatickou a hydrostatickou napjatost. Model je tedy nejdříve zatížen gravitačním zatížením, od nějž se odvíjejí další fáze výpočtu.



Obr. 6: Ukázka jednoduchého modelu řešení stability svahu pomocí MKP, zdroj: en.wikipedia.com

### 3. Přírodní poměry oblasti

#### 3.1. Poloha a popis lokality

Zájmová oblast se nalézá na území Moravskoslezského kraje, v okrese Karviná, v katastrálním území obce Doubrava. Na mapových podkladech 1 : 25 000 se oblast nalézá v SV rohu mapového listu, jde o mapový list 15-44-1. Pozemky zasažené zátopou a dolní partie dotčeného svahu jsou vlastnictvím OKD, a.s. Ostatní dotčené pozemky v oblasti S.N. jsou ve vlastnictví fyzických osob. Všechny parcely jsou vedeny jako orná půda, nebo „ostatní plochy“.

Zájmový svah se nachází přibližně v nadmořské výšce 210–280 m.n.m. Maximální sklon svahu je až 20°. Největšího sklonu přitom dosahuje v nejvyšších partiích svahu. Spodní část S.N. zasahuje až pod vodní hladinu zátopy Kozinec. Zájmová lokalita není přímo poddolována ani zastavěna. Nad i pod svahem vedou pozemní komunikace nižších tříd. Místní komunikace č. 23, nacházející se ve spodní části svahu je od března 2018 uzavřena. Uzavírka byla vyhlášena z důvodu obecného ohrožení svahovou nestabilitou Ujala, která je též součástí řešené lokality. Stav komunikace se navíc průběžně zhoršuje, jak pohybující se části svahu místy zhoršují stav vozovky. Svah je porostlý lesním porostem a náletovou vegetací, která výrazně omezuje prostupnost. Vegetace rovněž komplikuje možnosti leteckého monitoringu.

#### 3.2. Geomorfologické poměry oblasti

Podle geomorfologického zařazení oblast náleží k alpsko-himalájského systému, provincie Západní Karpaty, subprovincie Vněkarpatské sníženiny, oblasti severní Vněkarpatské sníženiny, celku Ostravské pánve na hranici Orlovské pánve a Ostravské nivy. Lokalita v minulosti prošla různými obdobími, které rozdílně utvářely současnou geomorfologii terénu. Nejmladší kvartérní vrstvy svahu byly během čtvrtohor ovlivňovány erozí sedimentárních hornin. V říční nivě pod svahem probíhalo ukládání říčního materiálu a deluvií ze svahu. Období kvartéru je též charakteristické střídáním dob ledových a meziledových, při kterých byla celá oblast Ostravska, tj. i Ostravská pánev několikrát zaledněna pevninským ledovcem. Jeho přítomnost dokazují např. bludné balvany nacházející se na různých místech Ostravska. V dobách interglaciálních (období mezi



dobami ledovými) byla oblast utvářena převážně vodními toky a atmosférickými vlivy jako vítr a déšť. Krajina zde proto získala ráz mírně zvlněné pahorkatiny, tvořené kvartérními glaciálními sedimenty, rozrušené erozí během dob meziledových. Četná údolí vytvořila vodní eroze, i pod svahy tedy převažují glacigenní deluvia, dále přecházející do nivních jílů a fluviálních sedimentů [8] [9].

### 3.3. Geologické poměry oblasti

Systém Vněkarpatských sníženin se zformoval během alpinského vrásnění, kdy se nově vznikající pohoří Karpat nasouvalo na starší Českou vysočinu. Ta se pod nápořem nasouvajících se Karpat začala zabořovat hlouběji do zemského pláště. Tato nově vzniklá sníženina byla během neogénu zatopena mořem, ve kterém probíhala sedimentace. V současnosti je proto plytké předkvartérní podloží tvořeno málo zpevněnými mořskými sedimenty jílového typu. Ze zpráv o geotechnickém monitoringu svahové fronty Ujala, firmy K-GEO s.r.o., vyplývá, že jde o marinní sedimenty, konkrétně o vápnité jíly až slíny [10] [11]. Skladba kvartérních souvrství je pozůstatkem dob ledových, během kterých byla oblast opakovaně zasažena pevninským ledovcem. Na příkrých svazích v současnosti dochází převážně ke gravitačnímu transportu. Souhrnně je tedy kvartérní pokryv tvořen nezpevněnými deluvii. Na svazích zájmové lokality nyní právě v těchto deluviích registrujeme převážně pomalé creepové pohyby. V údolních nivách má litologická stavba oblasti charakter spíše fluviálních nánosů. Vrchní část geologického profilu na lokalitě tvoří humózní hlíny a jíly porostlé vegetací [8].

### 3.4. Inženýrskogeologické podmínky na lokalitě

Zájmová lokalita se nalézá na hranici dvou morfologických celků s různou nadmořskou výškou i litologickou stavbou. Dotčenými celky jsou Orlovská pánev a Ostravská niva. Výškový rozdíl mezi těmito geomorfologickými celky je přes 50 metrů. Převýšení na konkrétním svahu pak je přibližně 45-50 m s maximálním sklonem až 20°. Svah tyto celky od sebe odděluje v délce několika kilometrů, z nichž velká část je již označena jako zmíněná riziková svahová nestabilita. I přes společnou geologickou minulost jsou na základě rozdílné geneze pokryvných zemin na svahu a pod ním výrazné rozdíly v litologické stavbě. Dobře patrné jsou rozdíly mezi glacigenními a deluviálními sedimenty v oblasti svahu a fluviálními sedimenty pod svahem. Litologická stavba celé oblasti je



vrstevnatá, což je způsobeno cykličností erozních činitelů a vodním transportem eluvií. Společným rysem celé oblasti je naproti tomu neogenní marinní podloží. Rozdílné mechanické vlastnosti hornin v podloží svahu a nadložních sedimentárních hornin tvoří potenciálně nestabilní souvrství. Stabilita svahu je navíc ovlivněna hydraulicky vodivými glacigenními zeminami ovlivňujícími saturaci svahu.

Dle vrtné dokumentace je předkvartérní podloží tvořeno jílovitými horninami a zeminami neogenního původu [12] [13]. Ty jsou zde spolu s méně soudržnými a propustnými glaciálními uloženinami vytvářejí rizikové souvrství. Obecně jílové horniny a jejich vlastnosti totiž bývají citlivé na změny vlhkosti, kvartérní nadloží je naproti tomu na přítomnost vody méně citlivé. Průsak vod z nadloží tak přímo negativně ovlivňuje vlastnosti podloží. Tento fakt je zde umocněn přítomností písčitých a pískovcových poloh v jílovém horizontu. Ty zde mohou fungovat jako hydrogeologické vodiče a saturovat tak jinak nepropustné podloží. Velmi nebezpečná je nyní také situace s tvorbou tahových trhlin na temeni svahu. Jejich hloubka, a tedy i vliv na vsakování do svahu však není známa. Samotná přítomnost a hmotnost vody v souvrství tak má velmi negativní vliv na stabilitu svahu. HPV ve zdejším svahu je tedy opodstatněně jeden z rizikových faktorů. Svah je dále ovlivňován projevy důlní těžby, která probíhá jižně od lokality. Těžba v blízkosti lokality způsobuje probíhající deformace povrchu terénu. Konkrétně jde o pokles povrchu terénu, který je nejlépe patrný na vzniklém průtočném jezeře na Karvinském potoce. Dosavadní pokles povrchu terénu se pohybuje v řádu metrů. Zdokumentovaný pokles jen mezi lety 2016 a 2017 je přibližně 50 cm [4] [14]. Z archivních leteckých mapových podkladů lze snadno vyčíst přibližné stáří poklesu terénu, které je asi 15 let a stále se rozvíjí. Tyto deformace mohou mít též rozhodující vliv na chování a rozvoj deformací svahu. Všechny zjištěné faktory působící na předmětný svah snižují jeho stabilitu, nebo alespoň zvyšují riziko tvorby poruch ovlivňující stabilitu svahu. Zvláště riziková geologická stavba a projevy již probíhajících pohybů jako jsou tahové trhliny. Svah totiž v důsledku svého přetváření, může podporovat rozvoj a aktivaci intenzivnějších pohybů aj. projevů svahových deformací.

Jako preventivní opatření proti další destabilizaci svahu a k uklidnění stávajících creepových pohybů proto proběhla v roce 2018 sanace zájmové oblasti. Sanace spočívá v odvodnění svahové nestability v patě svahu a přetížení vytěženou hlušinou. Odvodnění je realizováno přímými zářezy po spádnicí pod přítěžovací lavicí [12]. Drenážní materiál je hrubozrnný drcený lomový kámen. Účinnost takového odvodnění je však závislá na mocnosti odvodněného horizontu. Na základě vyhodnocení geologického řezu odhaduji že z důvodů blízké zátopy je mocnost snížení HPV maximálně v jednotkách metrů. Rovněž

možnosti gravitačního odvodnění jemnozrnných zemin jsou malé z důvodu kapilární vzlínivosti a značné porozitě. Nejnižší část sesuvu se navíc nalézá pod hladinou zátopy, což by logicky bylo ideální místo konstrukce přítěžovací lavice. Pro lepší dostupnost a nutnost odvodnění podloží však lavice je realizována na tělese rizikového svahu. Toto nevhodné umístění zátěže může v extrémním případě přispět k dalšímu snížení stability.

### 3.5. Hydrogeologické podmínky na lokalitě

Vzhledem k vlastnostem a skladbě kvartérního souvrství může při saturaci vodou dojít ke ztrátě stability těchto pokryvů. Navíc jílové podloží je citlivé na přítomnost vody. Při saturaci může dojít ke zhoršení vlastností a tedy snížení stability svahu.

Podle dat z hydrogeologické rajonizace České republiky oblast spadá do rajónu 2262 tj. Ostravská pánev, karvinská část. Jde o součást povodí Olše

Podzemní vody hlubokého oběhu jsou vázány na ruptury a pukliny karbonského masivu. Nadloží těchto kolektorů je tvořeno jílovými horninami a zeminami neogenního stáří, které plní funkci hydraulického izolátoru mezi starými karbonskými zvodněmi a mladšími kvartérními zvodněmi v nadloží.

Podle zpráv K-GEO s.r.o. je proudění vody v povrchových vrstvách silně ovlivňováno litologickou stavbou a klimatickými vlivy. Hrubozrnné eluvia a písčité polohy představují ideální prostředí pro proudění podzemní vody. Glacigenní štěrkopískové uloženiny a jejich styk s jílovými vrstvami jsou pak místa akumulace podzemní vody. Mělký oběh podzemní vody je tvořen prouděním právě v těchto kvartérních hydrologických vodičích.

Dominantní směr proudění podzemní vody je přibližně na sever, k toku Olše [10] [11].

Podle dat ČHMÚ z let 1981–2010 činí roční úhrn srážek 700–800 mm.

## 4. Tvorba modelové situace

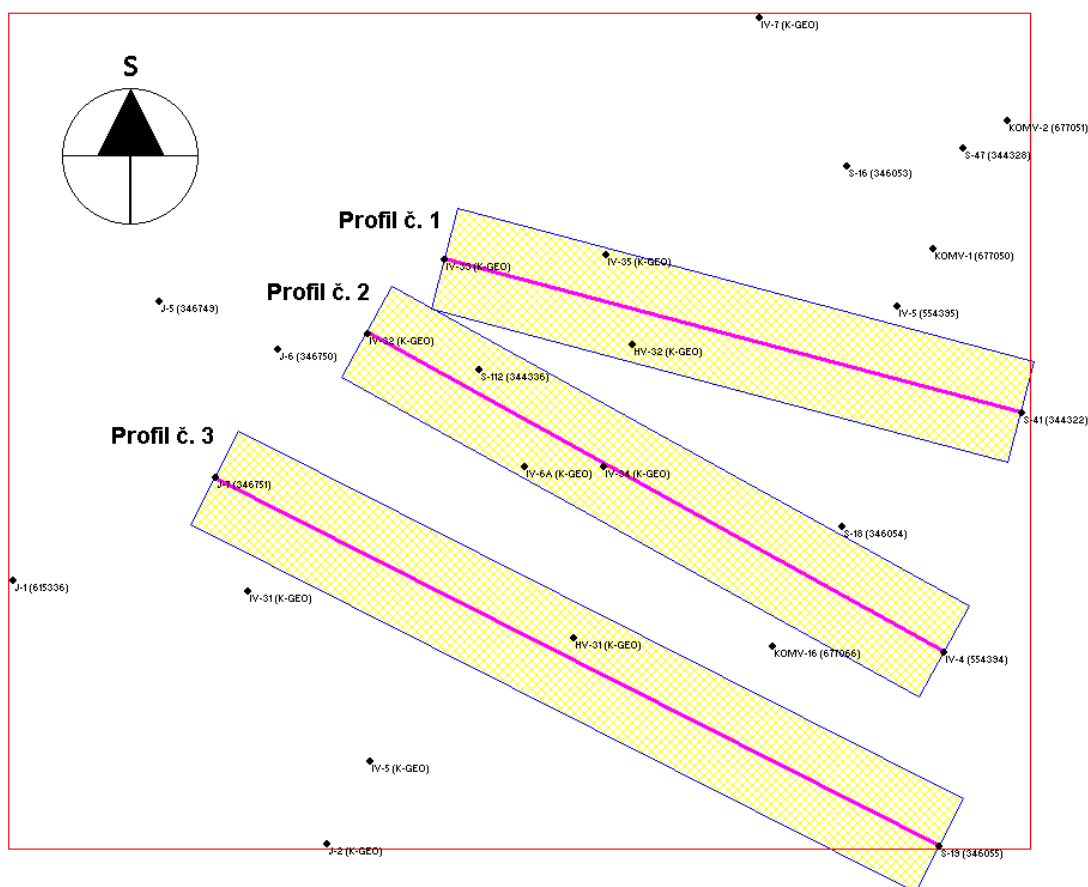
Výsledný geotechnický výpočetní model (řez) je výsledkem několika kroků zpracování dat o morfologii i geologii svahu. Nejdříve byly veškeré dostupné informace zpracovány do podoby hrubého 3D modelu oblasti. Odtud byly vybrány 3 řezy, které byly exportovány a upraveny do podoby realistického inženýrskogeologického řezu. Tyto jsou následně využity při řešení stability svahu ve specializovaném softwaru.

### 4.1. Tvorba 3D inženýrskogeologického modelu oblasti

Tvorba 3D inženýrskogeologického modelu zájmové oblasti je realizován v softwaru RockWorks 17. Tento program byl zvolen pro svou uživatelskou přívětivost při importu litologie a zaměření vrtů. Jednou z přidaných hodnot je navíc možnost zhodnocení morfologie a reliéfu neogenního horizontu. Samotné softwarové zpracování dat do podoby geologického modelu lokality však neodpovídá nárokům na následné vyhodnocení v softwaru Geo5 a Plaxis 2D. Následný 2D inženýrskogeologický model byl proto vytvořen v CAD softwaru na základě exportovaných výstupů.

### 4.2. Tvorba 2D geotechnického výpočetního modelu svahu

Výsledný 2D geotechnický výpočetní model je odbornou aproximací reálné geologické stavby svahu. Míra přesnosti modelu nepřímo závisí na počtu vrtných profilů po délce řezu použitých při interpretaci. Z tohoto důvodu jsou brány v úvahu i vrty, které neleží přímo na myšleném řezu, ale i v jeho blízkosti. Při tvorbě geologických řezů jsem pracoval i s vrty nacházejícími se v pruhu až 22,5 m od roviny modelu (tzn. v pásích širokých 45 m, zobrazených na obr. 7). Větší vzdálenost by sice zajistila více vrtů, avšak s nižší vypovídající hodnotou pro daný řez. Při větším počtu profilů navíc klesá i jejich důležitost. Tato možnost nastane, když další vrty jen potvrzují již zřejmé poznatky, a většinou nepřinášejí nové informace. V horším případě podávají protichůdná data.

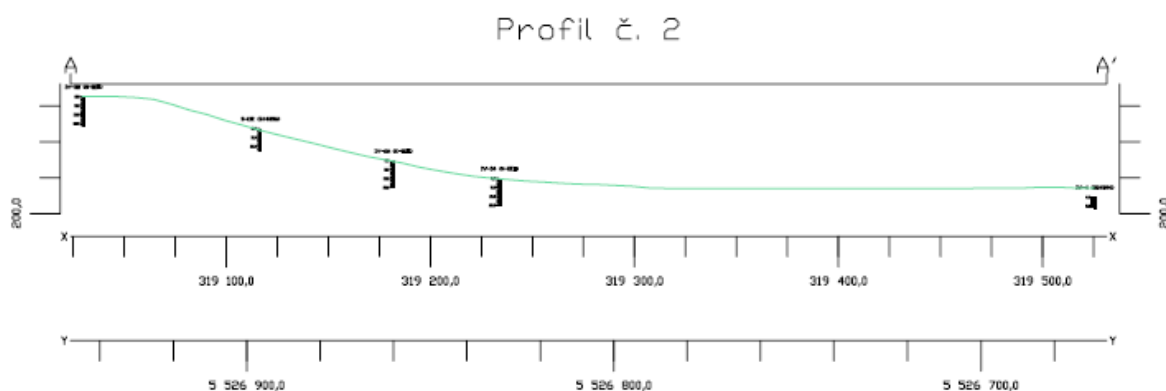


Obr. 7: Výběr vrtů pro tvorbu inženýrskogeologického řezu, vizualizace pruhu výběru

Minimální počet vrtů při tvorbě litologického řezu je 2. Toto množství je minimum i z důvodu jednoznačné lokalizace a orientace profilu. Se zvětšující se délkou profilu je nutné umísťovat doplňující vrty. Tyto doplňující vrty zkracují vzdálenost, na které je třeba extrapolace diskrétních dat. Množství těchto dodatečných vrtů by mělo odpovídat očekávané složitosti geologické stavby oblasti. V mém případě je podoba řezu č.1 založena na celkem 4 vrtech. Řez č.2 vychází z vrtné dokumentace 5-ti vrtů. Řez č.3 je založen na datech ze 3 vrtů. Vzhledem k původní délce profilu č.3 která činí 700 m jde až o extrémně nízké číslo. V tomto případě je však limitujícím faktorem nedostatek vrtů v blízkosti řezu. Vzhledem k jednodušší litologické stavbě než v případě řezu č.1 a č.2 a k povaze této práce nebylo přikročeno k realizaci dodatečných vrtů.

Ověření dostatečných rozměrů modelované oblasti nebylo provedeno výpočtem. V praxi totiž není žádný univerzální postup pro určení velikosti modelu pro výpočet stability svahu. Je však nutné předejít realizaci smykové plochy v blízkosti okrajů modelu, kde může dojít ke zkreslení výsledků [15]. Takto určené rozměry modelu jsou proto zvětšeny kvůli možným chybám v úsudku. Do hry zde totiž vstupuje vícero okolností jako např.: morfologie terénu, geologická stavba, HPV a vlastnosti zemin. Navíc je odhad velikosti modelu nadhodnocen v horní části svahu, kde se může smyková plocha propagovat na velké části modelu. Výchozí geologický řez je tedy nadhodnocen nad svahem z důvodu nejistoty polohy smykové plochy a odlučné hrany a rovněž i pod svahem kvůli snazší interpretaci profilu jako celku. Konečné geotechnické řezy tak vycházejí z geologického řezu jako je na obr. č. 8. Zde jsou patrné některé velké a zbytečné části svahu, které nebudou ve výpočtech potřebné. Z důvodu zjednodušení a zkrácení doby výpočtů, proto byly geologické řezy během závěrečné fáze interpretace ořezány. Zbytečná je především dlouhá rovinatá část pod svahem využitá při tvorbě litologické stavby svahu. K největším změnám proto došlo u délky geotechnických řezů, které by v původní velikosti zbytečně zasahovali až do středu zátopy. Zkráceny byly až téměř na úroveň pobřežní čáry.

Další důležitou dimenzí modelu při stabilitním výpočtu je hloubka modelu. Předpokládaná ani kritická smyková plocha se z důvodů ovlivnění výsledků okrajovou podmínkou nesmí přiblížit ke spodní hranici modelu. Tento rozměr byl též odhadnut a následně ověřen výpočtem v programu GEO5, při němž byla ověřena poloha kritické smykové plochy. Mocnost vrstev modelu totiž v nejnižším místě dosahuje jen cca 10 m. Lokalizace smykové plochy ve svahu však zajišťuje dostatečnou prostorovou rezervu od okraje modelu. Toto zjištění bylo nakonec potvrzeno nakonec i výpočtem MKP.

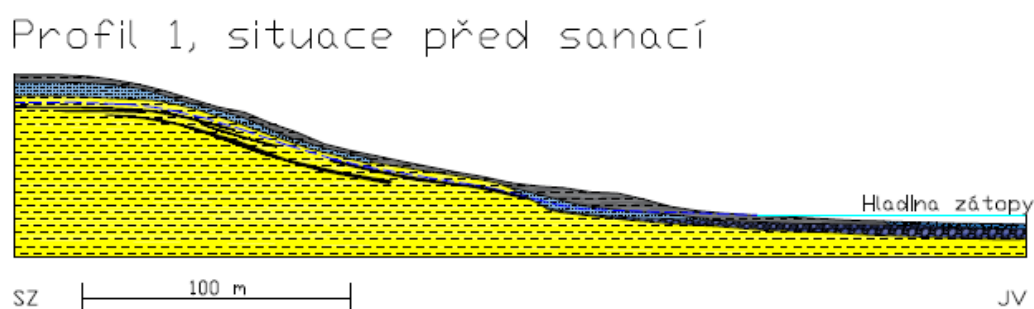


Obr. 8: Ukázka podoby profilu č. 2 po exportu ze softwaru RockWorks, před interpretací a úpravou rozměrů

#### 4.2.1. Rovinný geotechnický model č. 1

Řez č. 1 je z realizovaných nejsevernější a s konečnou délkou 376 m druhý nejdelší. Zachycuje svah s převýšením 52 m, tzn. spolu s řezem č. 2 svah s nižším převýšením. Reliéf modelu začíná na temeni svahu v nadmořské výšce 266,2 m. Řez je orientován ve směru SZ – JV (azimut 103°) a rychle dosahuje svého největšího sklonu 17°. Níže, cca. pod 240 m.n.m. se sklon svahu zmenšuje a postupně přechází do ploché údolní nivy o nadmořské výšce kolem 220 m.n.m. Myšlená hladina zátopy se nachází ve výšce 214 m a je určena na základě 5. DMT.

Litologická stavba vrstev kvartérního stáří v oblasti řezu č.1 je tvořena převážně souvislými vrstvami jílu, jílu písčitého a štěrku. V horní části svahu je půdní profil shora tvořen kvartérními jíly, pod nimi pak jíly písčitými. Neogenní jílové podloží se zde pohybuje v hloubce 4 – 6 m p.t. a je hustě laminováno pískovcovými polohami. HPV je zastižena právě nad oblastí těchto lamin. V dolní části svahu se nalézá obdobné souvrství, avšak navíc se štěrkovou polohou oddělující kvartérní jíly od podloží. HPV tuto vrstvu zřejmě zcela saturuje a níže plynule navazuje na hladinu zátopy. Oproti temeni svahu navíc u jílu písčitého pod svahem byly uvažovány reziduální parametry podobně jako v podloží. Reziduální parametry zde byly využity k zohlednění nižší smykové pevnosti zemin v oblasti smykové plochy. Neogenní podloží pod svahem neobsahuje pískovcové vrstvy.



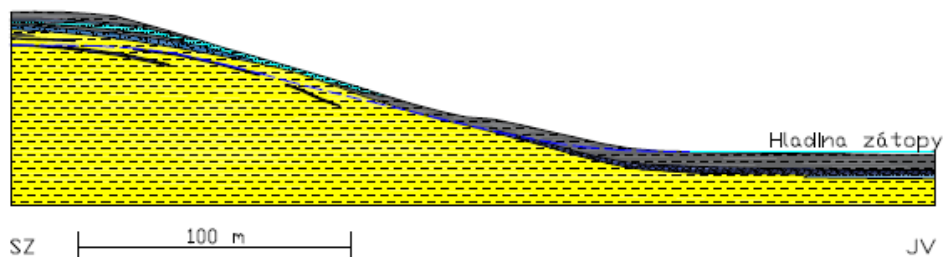
Obr. 9: Rovinný inženýrskogeologický model profilu č. 1

#### 4.2.2. Rovinný geotechnický model č. 2

Nejkratší geotechnický řez č.2 je dlouhý 340 m. Převýšení reliéfu dané oblasti je asi 51 m, srovnatelně s řezem č.1. Azimut roviny řezu je  $117^\circ$ . Nadmořská výška terénu na temeni svahu je 265,2 m.n.m. a hladina zátopy totožná s řezem č.1 tj. 114,0 m.n.m. Sklon svahu je téměř konstantní po celé délce svahu, je však ovlivněn plytkým zářezem pro pozemní komunikaci. Maximální sklon je  $17^\circ$  kterého je dosaženo na většině délky svahu, průměrný sklon je asi  $15^\circ$ . Model reliéfu je v tomto případě převzat v 5. DMT.

Litologie horní části svahu je o poznání složitější než v předchozím případě. Jíly a jíly písčité se střídají s písky a písky jílovitými. Tato výrazně vrstevnatá skladba tvoří celou horní polovinu svahu a pomáhá k infiltraci vody do svahu. HPV je zde však zastižena až v oblasti pískovcových poloh. Dolní části svahu mají obdobnou stavbu jako případě řezu č.1. Jde o připovrchové kvartérní jíly, pod nimiž leží saturované šterky a písčité jíly. HPV pod svahem se nalézá v blízkosti povrchu a též dosahuje hladiny zátopy.

Profil 2, situace před sanací



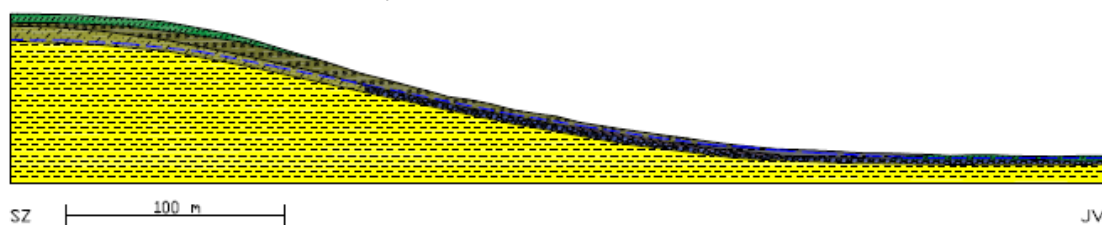
Obr. 10: Inženýrskogeologický model profilu č. 2

#### 4.2.3. Rovinný geotechnický model č. 3

Nejnižší třetí geotechnický řez má konečnou délku 500 m a modeluje svah s převýšením 65 m. Azimut tohoto řezu je  $115^\circ$  oproti severu a jako jediný nezasahuje do vodní plochy zátopy. Nejvyšší bod řezu se nachází 279,4 m.n.m. a nejnižší přibližně 215 m.n.m. Sklon svahu narůstá plynule a maxima  $17^\circ$  dosahuje přibližně uprostřed převýšení.

Geologický profil řezu je nejjednodušší z důvodu absence pískovcových poloh v podloží svahu. Rovněž vrstevnatost kvartérního souvrství je jednodušší. Připovrchové vrstvy jsou tvořeny hlínami s různým obsahem pískových a jílových příměsí. Pod nimi se v horní části svahu nachází vrstva hlinitých písků, níže štěrků. Poměrně vzácně se zde objevuje jílová poloha bezprostředně v patě svahu. Podloží neogenního stáří neobsahuje žádné pískové ani pískovcové vrstvi. Hloubka kvartérních vrstev zde dosahuje mezi 5 m pod svahem až do 10 m nad svahem. HPV byla nad svahem zastižena ve značné hloubce přes 10 m p.t., v oblasti říční pánve pod svahem je uvažována v úrovni hladiny zátopy Kozinec (tj. 214 m.n.m., cca 1 – 2 m p.t.)

Profil 3, situace před sanací



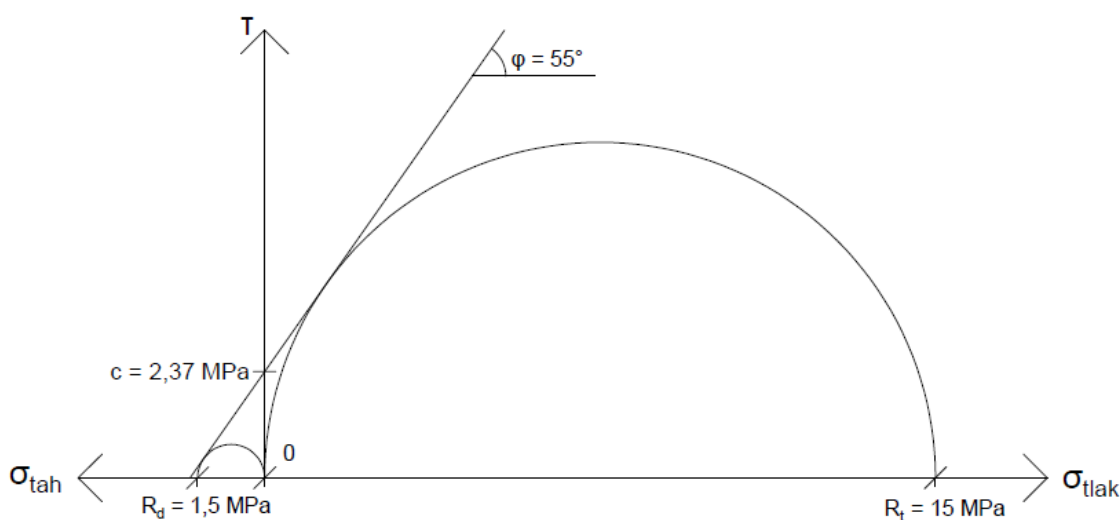
Obr. 11: Inženýrskogeologický model profilu č. 3



#### 4.3. Inženýrskogeologické charakteristiky litologických celků

Tato kapitola obsahuje tabulkový přehled všech získaných, vypočítaných a převzatých inženýrskogeologických charakteristik hornin a zemin vystupujících v této práci. Mnohé hodnoty jsou převzaty z laboratorních protokolů K-GEO s.r.o. zbývající pak byly získány výpočtem a odečtem z publikace Mechanika zemin Inženýrská geologie a Hydrogeologie v praxi. Hodnoty Poissonova čísla ( $\nu$ ) pocházejí z normy ČSN 73 1001 [16].

Pevnostní charakteristiky pískovce jsou odhadnuty na základě zařazení vzorků in situ, během vrtacích prací. Hodnota pevnosti v tlaku je tedy pouze teoreticky určená na základě obvyklých vlastností hornin. U hodnoty pevnosti v tahu byla v rámci dalšího zjednodušení uvažována hodnota 1/10 pevnosti v tlaku. Poissonovo číslo bylo i v tomto případě získáno z normy ČSN 73 1001. Zbylé hodnoty soudržnosti ( $c$ ) a úhlu vnitřního tření, u hornin též někdy nazývaného jako úhel smykové pevnosti ( $\varphi$ ), byly dopočteny pomocí grafického řešení Moohrovy teorie rovinné napjatosti, viz obr. č. 12. Tyto orientační hodnoty dále musely být výrazně sníženy z důvodu zohlednění odlišného chování celistvého horninového masívu a rozrušené horniny.



Obr. 12: Grafické vyšetření ( $\varphi$ ) a ( $c$ ) pomocí Moohrovy teorie napětí

Tab. 1: Přehled charakteristik převzatých z laboratorních protokolů K-GEO, s.r.o.

ID	Profil č.	Název	Provedení		Hloubka odb.	w [%]	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_n$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	W <sub>i</sub> [%]	W <sub>p</sub> [%]	I <sub>p</sub> [%]	I <sub>c</sub> [-]	n [%]	Sr [-]	C <sub>ef</sub> [kPa]	$\phi_{ef}$ [st.]	E <sub>oed</sub> [MPa]
1	1	IV-33	06.04.2018	N	5,7	19,09	2,68	1,96	1,65	38,04	19,08	18,96	1	38,68	0,81	12	25	15,22
2	1	IV-33	06.04.2018	Pp	11,6	19,22	2,69	2,02	1,69	40,08	19,2	20,89	1	37,13	0,88			
3	1	IV-33	06.04.2018	P	13,7		2,68			30,08	18,08	12						
4	1	IV-35	20.11.2018	N	5,2	20,57	2,69	2,04	1,69	35,96	16,49	19,47	0,79	37,03	0,94	10	24	7,11
5	1	IV-35	20.11.2018	N	7,6	19,52	2,68	2,02	1,69	40,59	17,56	23,03	0,92	36,93	0,89	10	22	
6	1	HV-32	12.04.2018	Pp	1,9	19,36	2,69	2,11	1,77	34,24	16,54	17,69	0,84	34,39	0,99			
7	1	HV-32	12.04.2018	Pp	4,4	26,21	2,66	1,96	1,56	29,79	20,23	9,56	0,37	41,41	0,98			
8	1	HV-32	12.04.2018	N	6,8	25,05	2,67	1,92	1,54	31,92	16,48	15,44	0,44	42,58	0,9	9	28	5,58
9	1	HV-32	12.04.2018	N	10,7	17,54	2,67	1,87	1,59	40,36	17,88	22,48	1,02	40,48	0,69	10	24	13,05
10	2	IV-32	05.04.2018	Pp	12,9	21,02	2,68	2	1,65	45,46	19,98	25,48	0,96	38,42	0,9			
11	2	IV-32	05.04.2018	N	14,8	18,62	2,7	2,08	1,75	35,09	18,57	16,52	1	35,01	0,93	10	25	20,43
12	2	IV-6A	19.11.2018	N	1,7	17,83	2,69	2,05	1,74	34,96	16,9	18,06	0,95	35,4	0,88	10	24	11,23
13	2	IV-6A	19.11.2018	Pp	2,4	21,01	2,69	2,03	1,68	39,32	16,5	22,82	0,8	37,73	0,93			
14	2	IV-6A	19.11.2018	Pp	4,1	21,13	2,68	1,98	1,64	35,8	18,56	17,24	0,85	39,05	0,89			
15	2	IV-6A	19.11.2018	N	7,1	22,99	2,66	2,02	1,64	27,04	23,03	4,01	1,01	38,16	0,99	6	24	9,25
16	2	IV-34	09.04.2018	Pp	1,9	18,96	2,69	2,09	1,76	31,91	17,96	13,95	0,93	34,63	0,96			
17	2	IV-34	09.04.2018	N	2,6	24,68	2,69	2,01	1,61	34,48	16,09	18,39	0,53	40,03	0,99	8	25	4,92
18	2	IV-34	09.04.2018	Pp	3,3	27,49	2,67	1,94	1,52	31,54	17,31	14,23	0,28	43	0,97			
19	2	IV-34	09.04.2018	N	3,7	25,5	2,68	1,96	1,56	32,66	18,3	14,36	0,5	41,66	0,96	8	25	5,79
20	2	IV-34	09.04.2018	Pp	5,3	25,21	2,67	2,02	1,61	29,05	18,57	10,48	0,37	39,58	1			
21	2	IV-34	09.04.2018	P	6,8		2,71											
22	2	IV-34	09.04.2018	Pp	7,9	20,6	2,66	2,07	1,71	25,3	20,58	4,73	1	35,65	0,99			
23	2	IV-34	09.04.2018	N	8,3	18,9	2,67	2,04	1,72	33,42	18,62	14,8	0,98	35,81	0,91	9	27	9,77
24	2	IV-34	09.04.2018	N	14,3	16,95	2,67	2,02	1,73	30,59	16,97	13,62	1	35,36	0,83	10	28	15,16

ID	Profil č.	Název	Provedení		Hloubka odběru	<b>w</b> [%]	<b>ρ<sub>s</sub></b> [g/cm3]	<b>ρ<sub>n</sub></b> [g/cm3]	<b>ρ<sub>d</sub></b> [g/cm3]	<b>W<sub>i</sub></b> [%]	<b>W<sub>p</sub></b> [%]	<b>I<sub>p</sub></b> [%]	<b>I<sub>c</sub></b> [-]	<b>n</b> [%]	<b>Sr</b> [-]	<b>C<sub>ef</sub></b> [kPa]	<b>φ<sub>ef</sub></b> [st.]	<b>E<sub>oed</sub></b> [MPa]
25	3	HV-31	11.04.2018	Pp	1,2	24,45	2,68	2,02	1,62	42,68	17,5	25,18	0,72	39,47	1			
26	3	HV-31	11.04.2018	N	2,1	26,79	2,67	2,02	1,59	35,96	16,42	19,54	0,47	40,22	1	8	24	4,76
27	3	HV-31	11.04.2018	P	5,3		2,71											
28	3	HV-31	11.04.2018	N	7,1	20,69	2,67	2,05	1,7	30,9	19,05	11,85	0,86	36,34	0,96	10	28	11,79
29	3	HV-31	11.04.2018	Pp	12,1	16,05	2,68	1,98	1,71	32,88	15,25	17,64	0,95	36,31	0,76			

Tab. 2: Přehled charakteristik použitých při modelování v softwaru Plaxis 2D

			Plaxis 2D					
Zemina	Stáří	Pozn.	Y <sub>unsat</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	Y <sub>sat</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]	E <sub>oed</sub> [MPa]	ν	C <sub>ef</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	φ <sub>ef</sub> [°]
Profil č. 1								
Jíl	Neogén		20,00	20,58	10,00	0,40	10,00	24,00
Jíl	Neogén	rez. parametry	20,00	20,58	9,00	0,40	7,00	17,00
Jíl písčitý	Kvartér	horní poloha	19,60	20,30	15,22	0,35	12,00	25,00
Jíl písčitý	Kvartér	dolní poloha	19,20	19,60	5,58	0,35	9,00	28,00
Jíl	Kvartér		20,50	20,65	8,00	0,40	10,00	27,00
šterk	Kvartér		20,50	20,50	140,00	0,25	2,50	45,00
Pískovec	Kvartér		22,00	23,00	1000,00	0,20	500,00	40,00
Materiál lavičky			21,00	22,50	100,00	0,20	4,00	35,00
Profil č. 2								
Jíl	Neogén		20,30	20,70	16,00	0,40	9,00	26,00
Jíl	Neogén	rez. parametry	20,30	20,70	14,00	0,40	5,00	15,00
šterk	Kvartér		20,50	20,60	140,00	0,20	1,00	45,00
Jíl písčitý	Kvartér		19,60	20,30	15,22	0,35	12,00	25,00
Jíl	Kvartér		20,00	20,50	10,00	0,40	11,00	27,00
Jíl	Kvartér	rez. parametry	20,00	20,50	8,00	0,40	3,00	13,00
Pískovec	Kvartér		22,00	23,00	1000,00	0,20	500,00	45,00
Písek	Kvartér		19,00	20,50	14,00	0,28	2,00	33,00
Písek jílovitý	Kvartér		19,40	21,40	27,00	0,35	5,00	27,00
Materiál lavičky			21,00	22,50	100,00	0,20	4,00	35,00
Profil č. 3								
Jíl	Neogén		20,00	20,75	15,00	0,40	10,00	28,00
Jíl	Neogén	rez. parametry 1	20,00	20,75	11,80	0,40	5,00	15,00
Jíl	Neogén	rez. parametry 2						
Jíl	Kvartér		20,20	20,20	6,00	0,40	10,00	27,00
Jíl	Kvartér	rez. parametry						
šterk	Kvartér		20,50	20,50	140,00	0,22	3,00	45,00
Hlína	Kvartér		19,00	21,00	6,00	0,40	13,00	24,00
Hína jílovitopísčitá	Kvartér		19,50	20,50	7,50	0,33	7,00	28,00
Písek hlinitý	Kvartér		19,00	21,00	8,00	0,30	6,00	26,00
Jíl šterkovitý	Kvartér		20,30	22,00	8,00	0,32	7,00	26,00
Materiál lavičky			21,00	22,50	100,00	0,20	4,00	35,00

Tab. 3: Přehled charakteristik použitých při modelování v softwaru Geo5

			GEO-5, Stabilita svahu					
Zemina	Stáří	Pozn.	$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	n [-]	$C_{\text{ef}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_{\text{ef}}$ [°]
<b>Profil č. 1</b>								
Jíl	Neogén		20,00	<b>20,58</b>	26,80	0,37	10,00	24,00
Jíl	Neogén	rez. parametry	20,00	<b>20,58</b>	26,80	0,37	1,50	12,00
Jíl písčitý	Kvartér	horní poloha	19,60	<b>20,25</b>	26,80	0,39	12,00	25,00
Jíl písčitý	Kvartér	dolní poloha	19,20	<b>19,58</b>	26,80	0,43	4,00	19,00
Jíl	Kvartér		20,50	<b>20,65</b>	26,70	0,37	9,00	25,00
Štěrka	Kvartér		20,50	22,50			1,00	45,00
Pískovec	Kvartér		22,00	23,00			300,00	25,00
Materiál lavičky			21,00	23,00			1,00	35,00
<b>Profil č. 2</b>								
Jíl	Neogén		20,30	<b>20,71</b>	27,00	0,37	8,00	26,00
Jíl	Neogén	rez. parametry	20,30	<b>20,71</b>	27,00	0,37	2,00	12,50
Štěrka	Kvartér		20,50	22,50			1,00	45,00
Jíl písčitý	Kvartér		19,60	<b>20,25</b>	26,80	0,39	15,00	25,00
Jíl	Kvartér		20,00	<b>20,37</b>	27,00	0,39	9,00	25,00
Jíl	Kvartér	rez. parametry	20,00	<b>20,37</b>	27,00	0,39	2,00	12,50
Pískovec	Kvartér		22,00	23,00			300,00	25,00
Písek	Kvartér		19,00	21,00			2,00	33,00
Písek jílovitý	Kvartér		19,40	21,40			5,00	27,00
Materiál lavičky			21,00	23,00			1,00	35,00
<b>Profil č. 3</b>								
Jíl	Neogén		20,00	<b>20,75</b>	26,80	0,36	10,00	28,00
Jíl	Neogén	rez. parametry 1	20,00	<b>20,75</b>	26,80	0,36	2,00	12,50
Jíl	Neogén	rez. parametry 2	20,00	<b>20,75</b>	26,80	0,36	2,50	13,50
Jíl	Kvartér		20,20	<b>20,20</b>	26,80	0,40	8,00	24,00
Jíl	Kvartér	rez. parametry	20,20	<b>20,20</b>	26,80	0,40	2,00	14,00
Štěrka	Kvartér		20,50	20,50			1,00	45,00
Hlína	Kvartér		19,00	21,00			13,00	24,00
Hlína jílovitopísčitá	Kvartér		19,50	21,50			5,50	26,00
Písek hlinitý	Kvartér		19,00	21,00			6,00	26,00
Jíl štěrkovitý	Kvartér		20,30	22,30			6,00	24,00
Materiál lavičky			21,00	23,00			1,00	35,00

## 5. Modelování v prostředí softwaru Geo5

Software GEO5 od společnosti Fine je specializovaným geotechnickým nástrojem pro řešení mnoha úloh. Skládá se z mnoha modulů, z nichž každý je určen k řešení jiné geotechnické stavby: např. piloty a mikropiloty, opěrné konstrukce, pažení, sedání, stabilita svahu, MKP atd. Pro 2D řešení stability svahu jsem proto vybral modul „Stabilita svahu“, který umožňuje snadný import i přiřazení zemin. Pracuje na principu proužkových metod výpočtu stability. Nevýhodou takového výpočtu je pouze určení stability svahu, případně aktivních a pasivních složek namáhání. Nelze vyvozovat žádné deformace svahu, napětí ani jejich lokalizaci.

### 5.1. Parametry a předpoklady výpočtu rovinné úlohy v programu GEO-5

Stabilitní výpočet v softwaru GEO5 je uskutečněn s běžným nastavením. Bez vlivu přírodní ani uměle indukované seismicity. S posouzením pomocí vypočteného stupně stability  $F_s$ . Při posuzování stability svahu se jako dlouhodobě stabilní masív bere zpravidla takový, jež má  $F_s$  větší než 1,3. V závislosti na okolnostech jako, rozsah, riziko a nejistoty se však můžeme setkat i s mezními hodnotami 1,5 nebo dokonce vyšší. Zde je brána jako mezní hodnota  $F_s = 1,3$ , což znamená že poměr všech pasivních sil k silám aktivním je 1,3 : 1,0.

Poloha a tvar smykové plochy jsou přibližně známy z geotechnického monitoringu na svahové frontě. Prvotní zadání polygonální smykové plochy je tedy založeno na informacích o hloubce skutečné smykové plochy v daném místě. Finální kritická smyková plocha je následně zjištěna optimalizačním výpočtem stability dle Morgenstern-Price metody. Tato proužková metoda je založena na splnění silových i momentových podmínek rovnováhy na jednotlivých proužcích. Oproti jednodušším metodám též zohledňuje silové působení mezi jednotlivými proužky zeminy. Navíc oproti jiným způsobům výpočtu uvažuje s odlišným sklonem těchto sil na každém elementu.

Na takto optimalizované smykové ploše pak byl proveden výpočet podle všech dostupných metod mezní rovnováhy pro polygonální smykové plochy (Sarma, Spencer, Janbu, Morgenster-Price). Pro zaručení jistoty stability je třeba aby všechny vypočtené hodnoty stupně  $F_s$  byly větší než 1,3.

## 5.2. Výsledky analýzy stability svahu

Výpočtem situace aktivace svahové nestability (tzn. se zvýšenou HPV a zavedením reziduálních parametrů) byl potvrzen nedostatečný stupeň stability u všech řešených inženýrskogeologických řezů. Zjištěné hodnoty stupně stability  $F_s$  jsou v rozsahu od 0,93 do 1,04. Tyto hodnoty naznačují, že svah je na samé hranici své stability a některé jeho části ji dokonce překročily. Je však třeba zdůraznit, že v modelu bylo v tomto případě uvažováno s velmi nízkými parametry reziduální smykové pevnosti. Ačkoliv tyto parametry nejsou zcela v rozsahu laboratorně zjištěných hodnot, byly použity pro zvýšení vlivu doložené smykové plochy a dosažení doložené snížené stability.

### Zjištěné hodnoty stupně stability

#### Profil č. 1

##### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :	$FS = 1,04 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Spencer :	$FS = 1,01 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Janbu :	$FS = 0,99 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Morgenstern-Price :	$FS = 1,01 < 1,30$	NEVYHOVUJE

#### Profil č. 2

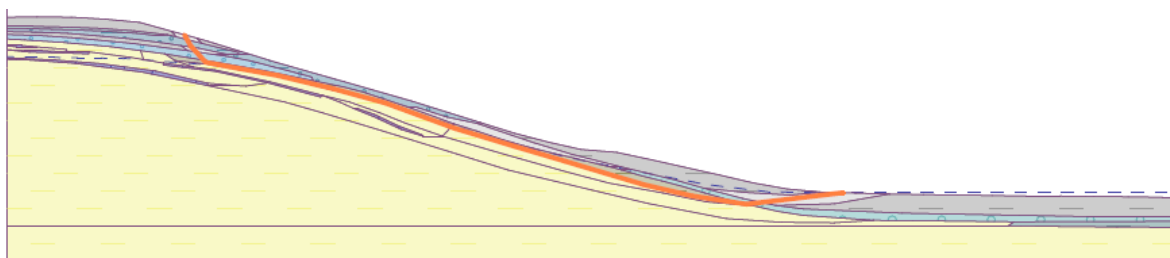
##### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :	$FS = 1,00 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Spencer :	$FS = 0,99 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Janbu :	$FS = 0,97 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Morgenstern-Price :	$FS = 0,97 < 1,30$	NEVYHOVUJE

#### Profil č. 3

##### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :	$FS = 0,93 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Spencer :	$FS = 0,95 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Janbu :	$FS = 0,94 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Morgenstern-Price :	$FS = 0,94 < 1,30$	NEVYHOVUJE



Obr. 13: Ukázka výpočetního modelu IG řezu č. 2, situace bez sanace

Následoval výpočet situace, ve které byla realizována přítěžovací lavice, ovšem bez odvodnění. Výpočet ponechává stejné vlastnosti zemin, včetně reziduálních i geometrii svahu. Do modelu je přidán pouze násep hlušiny pro přetížení. Zjištěné hodnoty stupně stability se na všech profilech pohybují v intervalu od 1,18 do 1,32. Je tedy zřetelné výrazné zvýšení stupně stability, způsobené samotným přetížením. Nastaveným parametrům však vyhovují pouze dva ze tří profilů, a to pouze při jediné metodě výpočtu – dle Spencera. Potřebného zvýšení stability by tedy zdá se mohlo být dosaženo zvětšením přítěžovací lavice. Tato možnost však není zcela vhodná z důvodu nedostatku místa pod svahem.

## Zjištěné hodnoty stupně stability

### Profil č. 1

#### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :	$FS = 1,19 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Spencer :	$FS = 1,25 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Janbu :	$FS = 1,24 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Morgenstern-Price :	$FS = 1,24 < 1,30$	NEVYHOVUJE

### Profil č. 2

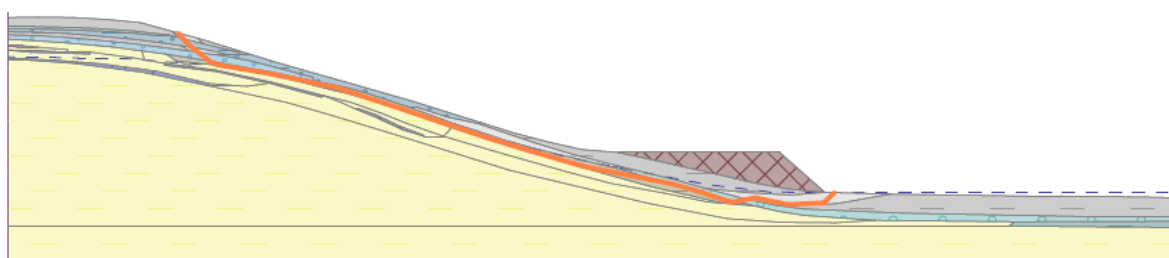
#### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :	$FS = 1,19 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Spencer :	$FS = 1,31 > 1,30$	VYHOVUJE
Janbu :	$FS = 1,26 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Morgenstern-Price :	$FS = 1,26 < 1,30$	NEVYHOVUJE

### Profil č. 3

#### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :	$FS = 1,18 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Spencer :	$FS = 1,32 > 1,30$	VYHOVUJE
Janbu :	$FS = 1,28 < 1,30$	NEVYHOVUJE
Morgenstern-Price :	$FS = 1,28 < 1,30$	NEVYHOVUJE



Obr. 14: Ukázka výpočetního modelu IG řezu č.2, situace pouze přetížení



Výpočet situace přetížení i odvodnění paty svahu je poslední variantou výpočtu, při které by mělo dojít ke zvýšení stability nad požadovanou mez. Vstupní data i model pro výpočet zůstali totožné s předchozím výpočtem. Výjimkou je hladina podzemní vody, která byla s ohledem na místa s propustnějšími vrstvami snížena až na hladinu zátopy Kozinec. Nyní vypočtená hodnota  $F_s$  se nachází v rozpětí 1,31 až 1,49. Tímto výpočtem byla zjednodušeně ověřena metoda skutečně provedené sanace svahového pohybu.

## Zjištěné hodnoty stupně stability

### Profil č. 1

#### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :  $FS = 1,40 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Spencer :  $FS = 1,34 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Janbu :  $FS = 1,31 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Morgenstern-Price :  $FS = 1,33 > 1,30$  **VYHOVUJE**

### Profil č. 2

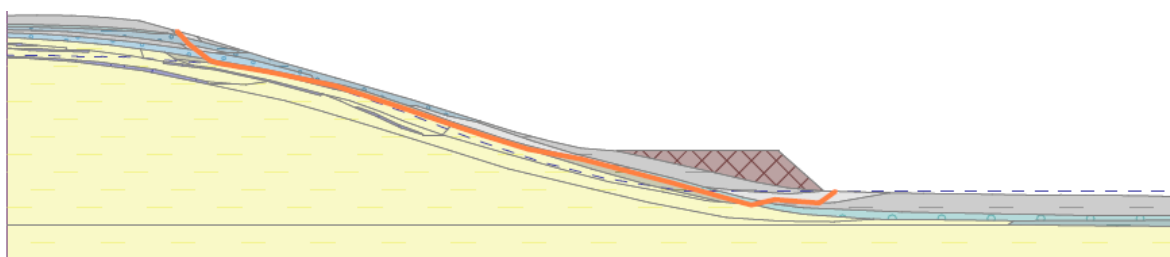
#### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :  $FS = 1,35 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Spencer :  $FS = 1,43 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Janbu :  $FS = 1,36 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Morgenstern-Price :  $FS = 1,36 > 1,30$  **VYHOVUJE**

### Profil č. 3

#### Posouzení stability svahu (všechny metody)

Sarma :  $FS = 1,34 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Spencer :  $FS = 1,49 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Janbu :  $FS = 1,44 > 1,30$  **VYHOVUJE**  
 Morgenstern-Price :  $FS = 1,44 > 1,30$  **VYHOVUJE**



Obr. 15: Ukázka výpočetního modelu IG řezu č.2, situace přetížení i odvodnění

### 5.3. Zhodnocení výsledků

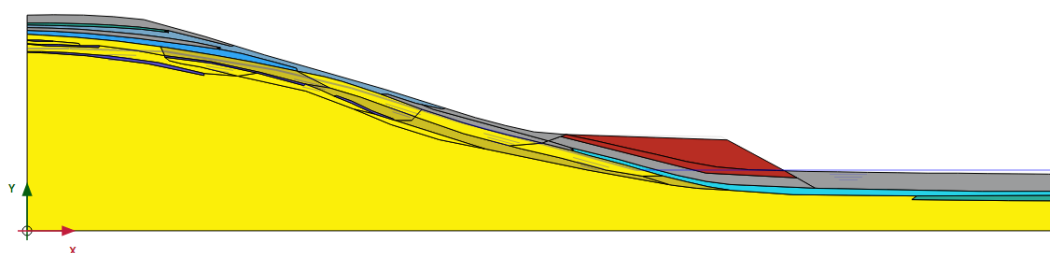
Jednoznačnou výhodou modelování stability svahu v programu Geo5 je jednoduchost a rychlost výpočtu. I méně zručný řešitel by měl být schopen provést analýzu svahu. Podstatnou nevýhodou je však nemožnost komplexního vyšetření svahu, jako např. deformace a napětí v masivu. Proto by v podobných poměrně složitých situacích na svahu měly být použity i jiné metody výpočtu. Zhodnocení výsledků modelování, které vycházejí pouze z programu Geo5, není dostatečně výstižné a je třeba to brát v úvahu. V kapitolách níže proto bude ještě následovat zhodnocení výsledků MKP a souhrnné zhodnocení.

Výpočtem se podařilo napodobit nedostatečnou stabilitu svahu, prakticky na hranici poruchy. Tato situace odpovídá pozorovaným projevům v terénu, kdy se svah prokazatelně deformuje a vytváří smykovou plochu. Model však počítá se znatelně nižšími reziduálními vlastnostmi zemin. Svah je tedy uměle destabilizován. Výpočet navíc nijak neověřuje správnost geometrie a polohy smykové plochy, protože je predisponována oslabenými zeminami. Smyková plocha proto byla navedena až pod těleso lavičky, aby simulovala nejnepríznivější možnost. I přes tuto skutečnost však navržené sanační opatření, spočívající v přitížení a odvodnění paty svahu, zajišťuje dostatečný nárůst stability. Výsledkem samotného modelování v programu Geo5 by tedy bylo potvrzení správného navržení sanačního opatření.

## 6. Modelování v prostředí softwaru Plaxis 2D

Software Plaxis 2D je jedním z pokročilých programů firmy Bentley Systems, Inc. Firma se specializuje na vývoj komplexního softwaru na řešení geotechnických problémů od realizace tunelu, přes výkopy až po stabilitu svahu. Existují přitom 2D i 3D varianty daného programu, upravené verze specializované na výpočet dynamických úloh atd. Jde o plnohodnotný nástroj využívající metody konečných prvků (MKP) k řešení geotechnických úloh jako mechaniky kontinua. Jednoznačnou výhodou tohoto řešení je výsledná znalost přetvoření a napětí v místě daného modelu. Program je při tom uživatelsky přívětivý a umožňuje tak práci i méně zkušeným uživatelům. Je však potřeba alespoň základního seznámení s principy výpočtu, nároky na vstupní data a geometrii. Výraznou výhodou je tedy samozřejmě odbornost geotechnika provádějícího výpočet, chápající souvislosti vstupů a výstupů řešení.

Prvním krokem k výpočtu je definování oblasti modelu a nastavení parametrů vstupů. tj. rozměry modelu, jednotky, model chování zemin, tvar elementů a počet uzlových bodů. Následuje import téměř totožné geometrie jako v případě softwaru Geo5. Vzhledem k nutnosti následného „zasítování“ modelu však bylo potřeba vzít v úvahu některé limitující faktory, jako ostré úhly a příliš malé elementy. Příprava pokračuje zadáním jednotlivých zemin a jejich vlastností a určení HPV pro jednotlivé fáze výpočtu. Veškerou geometrii pro kteroukoli fázi je nutno zadat a zkontrolovat v tzv. iniciační fázi. Přidávání objektů v dalších krocích výpočtu není možné, je potřeba se vždy vrátit do iniciační fáze a model upravit a znovu zasítovat, což způsobuje zbytečnou ztrátu času.



Obr. 16: Úplná geometrie modelu č. 2 v prostředí programu Plaxisu 2D

Výpočet je začíná gravitačním zatížením iniciační fáze, která slouží ke stanovení originální geostatické a hydrostatické napjatosti. V modelu přitom není zohledněna přítěžovací lavice ani vyšší hladina podzemní vody. Model je při této proceduře výrazně deformován, tyto deformace přitom nejsou reálné. V dalších fázích výpočtu jsou proto tyto posuny nulovány. V dalších krocích výpočtu již probíhá variantní plastický výpočet daného svahu.

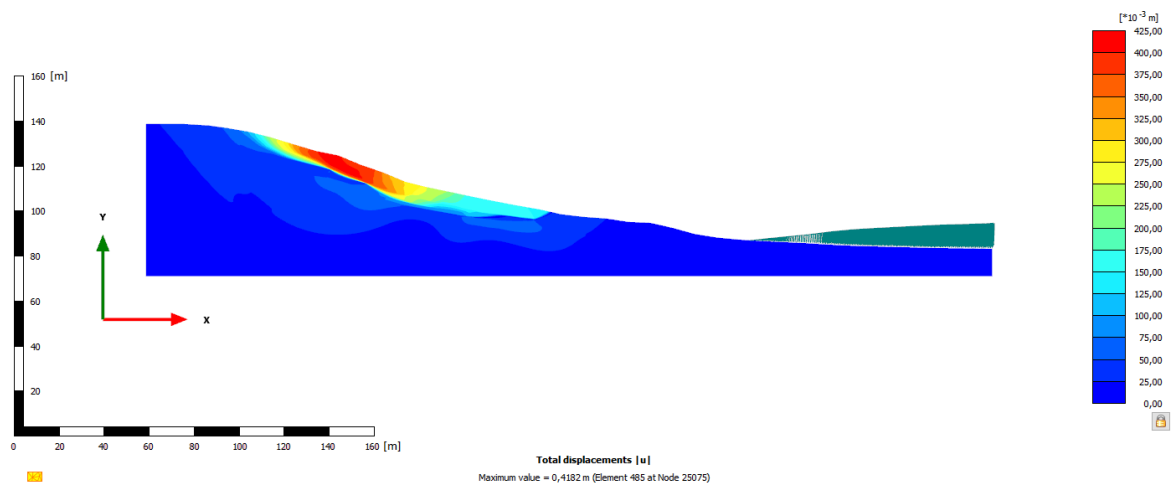
## 6.1. Parametry a předpoklady výpočtu rovinné úlohy

Výpočet v programu Plaxis 2D byl realizován bez vlivu seismicity a jiných dynamických vlivů. Deformace a napětí v tělese přítěžovací lavice nebylo dále šetřeno, jakož i její konsolidace. Hledány byly pouze posuny, napětí a jejich lokalizace ve svahu. K tomuto výpočtu zcela dostačuje plastický výpočet deformací. Z povahy výpočtu je zřejmé, že výsledkem není žádné číslo udávající stabilitu svahu. Proto v tomto ohledu beru výsledky za průkazné, pokud deformovaný model vykazuje srovnatelné chování jako reálný svah. To jsou především deformace, plastické body a trhliny v horních partiích svahu a na smykové ploše, je-li vytvořena.

Poloha a tvar smykové plochy zde z podstaty fungování programu nejsou jasně definovány. Poloha je zřejmá pouze ze skokové změny hledaných veličin, případně z přítomnosti plastických bodů v blízkosti. Hlavním cílem během výpočtu tedy bylo najít takové hodnoty smykové pevnosti podloží, které zapříčiní maximální rozvoj smykové plochy, ale ještě nezpůsobí „zkolabování“ modelu z důvodu nenalezení rovnováhy působících sil. Tato úloha se ukázala jako velmi obtížná a zabrala desítky iterací, než bylo nalezeno přijatelné řešení pro nestabilní svah. Řešení sanačních opatření pak byla realizována na modelu se stejnými vstupními daty a se stejnou výchozí situací.

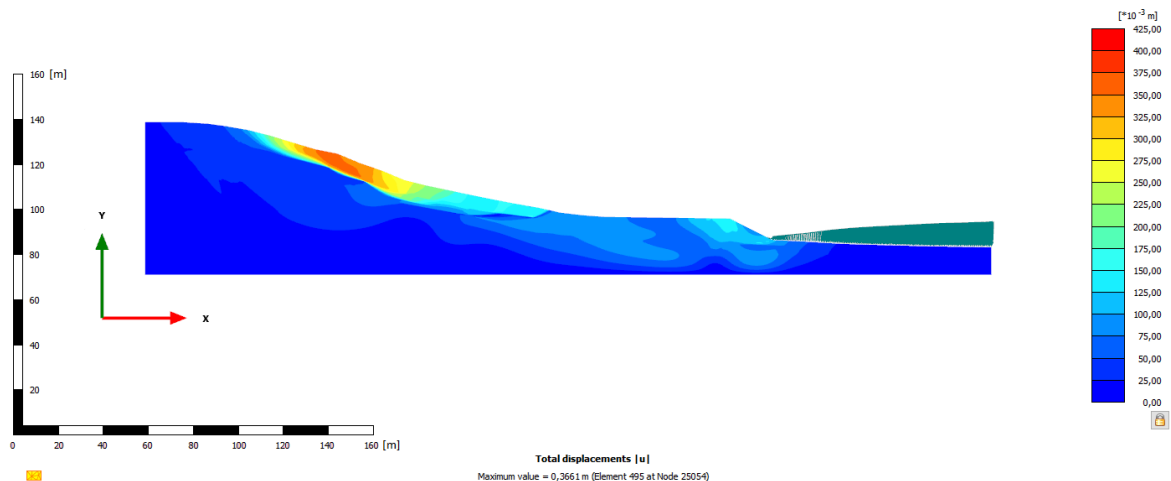
## 6.2. Výsledky analýzy napětí a přetvoření horninového masívu

Plastickým výpočtem nestabilního svahu byly v případě všech profilů zjištěny výrazné deformace v horní části svahu. Největší posuny se projevují v blízkosti odlučné hrany svahové deformace – obr. č. 17. Dominantní jsou zde přitom horizontální složky posunů, které mohou tvořit více než 90 % celkových posunů. Tyto projevy jsou rozporu s pozorováním „in situ“, kdy na odlučné hraně jsou v současnosti dokumentovány převážně vertikální posuny (poklesy). Níže na svahu se tyto deformace zmenšují. Již v oblasti pozemní komunikace pod svahem, dle výsledků modelování, nedochází z žádným projevům svahových pohybů. Toto zjištění je též podobné skutečnosti, neboť např. na povrchu silnice pod svahem jsou až na jednu oblast, dokumentovány pouze zanedbatelné poruchy. Pozn.: V místě, kde silnice prochází oblastí severního okraje sesuvu, jsou pozorovány trhliny v povrchu vozovky, svědčící o pohybu svahu v řádu centimetrů. Toto chování svahu naznačuje na nevhodně zvolené sanační opatření, neboť se nachází mimo těleso aktivní svahové deformace.



Obr. 17: Největší deformace před sanací byly zjištěny na profilu č. 1 – přes 41 cm

Výpočet svahu s vlivem snížení HPV a přetížení v podstatě potvrdil nedostatečné zvýšení stability svahu. Na zájmovém svahu dochází i přes znatelné snížení deformací ke značným posunům v horní části svahu. Jak je patrné z obr. 18, jejich rozložení je obdobné jako ve fázi před sanací. Opět jde převážně o horizontální posuny, které byly v modelu zmenšeny zřejmě vlivem roztlačení jílovité zeminy pod tělesem přítěžovací lavice. Právě deformace tělesa násypu v některých případech dokonce překonávají deformace svahu. I když tyto deformace násypu nejsou směrodatné, svědčí o neúnosnosti podloží.

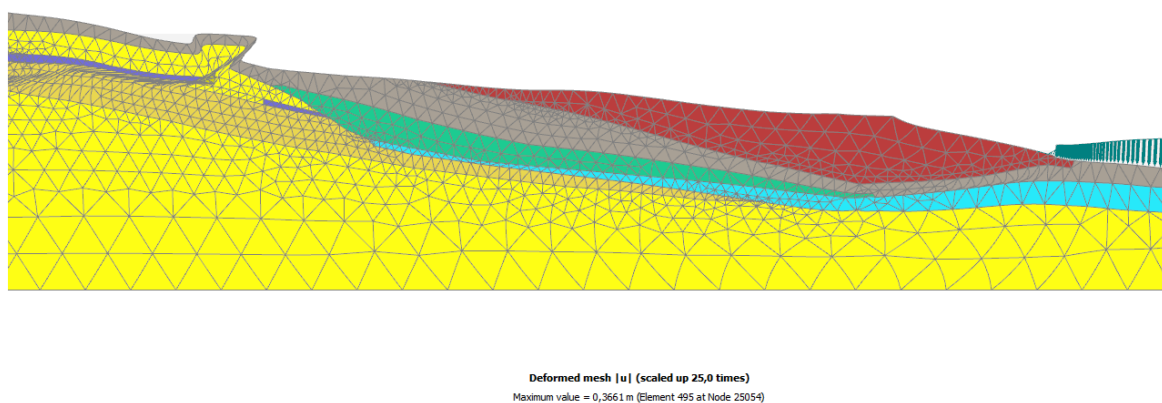


Obr. 18: Deformace na profilu č. 1 po sanaci – přes 36 cm

V kapitolách níže se dále zabývám detailnější analýzou výsledků. Výpočet MKP totiž podává širokou škálu poznatků o procesech v tělese svahu. Rozebrány jsou zde kromě posunů i pórové tlaky, body plastického a tahového porušení a čerpání smykové pevnosti.

### 6.2.1. Podrobná analýza výsledků na profilu č. 1

Na profilu č. 1 byly výpočtem zjištěny největší posuny ze všech řešených profilů. Největší hodnota posunů před přetížením dosahuje 41,82 cm a 36,61 cm po sanaci. Z toho 39,27 cm, respektive 34,44 cm jsou pouze horizontální deformace. Deformace probíhají převážně rovnoměrně po výšce sesuvných vrstev, což svědčí o kerné povaze svahového pohybu. Deformace přítěžovacího násypu jsou přes 10 cm a dle přetvoření modelu jsou způsobeny zabořením do neúnosného podloží – viz. obr. 19. Dobře lze sledovat přetvoření jednotlivých elementů sítě v oblasti kvartérních jíílů pod tělesem násypu. Vzhledem k nedosažení výrazného snížení deformací, se navíc svah i nadále jeví jako nestabilní. Při zohlednění pouze modelové situace, se zdá že bylo realizováno nevhodné sanační opatření.



Obr. 19: Detail přetvoření vzniklých přetížením na profilu č. 1, deformace zvětšeny 25x

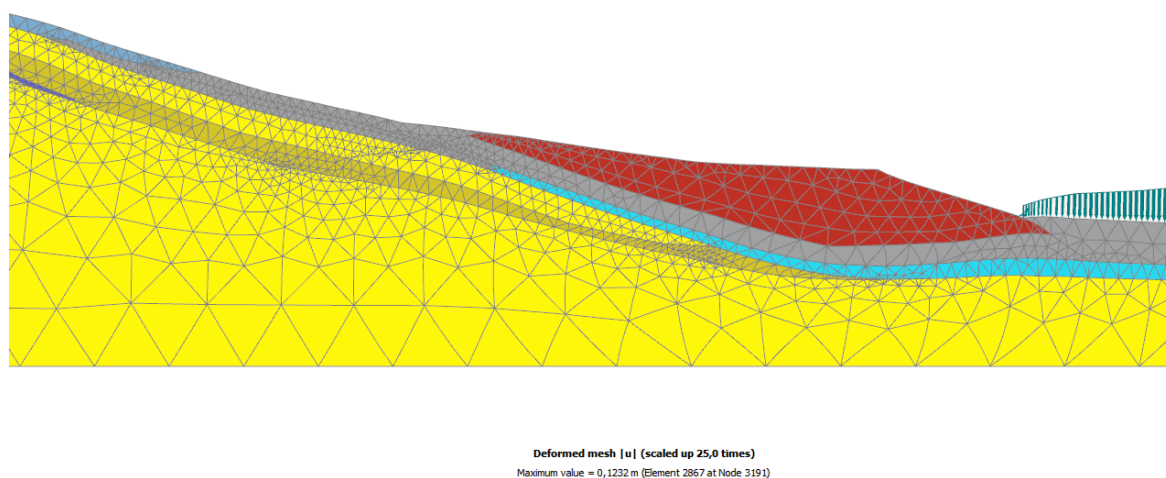
Smyková plocha je ostře vymezena hlavně ve střední části svahu, a to v hloubce rozhraní kvartérních a neogenních vrstev. Neogenním jíílům jsou zde přiřazeny nižší reziduální parametry, jako zohlednění saturovaných poloh oslabených pohyby na ověřené smykové ploše. V horní i dolní části deformované části svahu dochází spíše k pozvolnému přetváření. Toto chování je v dobrém souladu s pozorováním, především v dolní části svahu, kde přetváření svahu není zřejmé.

Pórové tlaky jsou v celém masívu rozloženy rovnoměrně. Téměř v celé modelované oblasti se pohybují v mezích od  $-100 \text{ kN/m}^2$  do  $100 \text{ kN/m}^2$ , pouze v místech pískovcových lamin dosahují extrémních hodnot až kolem  $1000 \text{ kN/m}^2$ . Po sanačním přetížení a deformaci masívu je i přes snížení HPV znatelné mírné zvětšení pórových tlaků pod tělesem násypu. Mírné poměrné snížení schopnosti efektivního přenosu zatížení však nemá negativní vliv na stabilitu svahu, neboť přetížení vyvolala výrazné zvětšení totální napjatosti.

Čerpání smykové pevnosti je velmi vysoké v celé modelované oblasti. I tak je však patrné zlepšení situace v kvartérních pokryvech v dolní části svahu. V neogenním podloží naopak dochází ke zvýšení smykového napětí. Nečekaně však nedošlo k omezení výskytu plastických bodů ani tahových porušení. Jejich poloha je však obdobná jako na skutečném svahu.

### 6.2.2. Podrobná analýza výsledků na profilu č. 2

Prostřední profil č. 2 vykazuje ze všech zkoumaných, nejmenší deformace. Největší hodnota posunu na svahu před přetížením je  $11,31 \text{ cm}$ , z toho  $10,83 \text{ cm}$  tvoří horizontální složka. Ve fázi sanace došlo ke zmenšení deformace svahu na méně než  $7 \text{ cm}$ . Za zmínku však stojí výrazné přetvoření násypu lavice, které dosahuje v maximu  $12,32 \text{ cm}$ . Kontrolou deformované sítě pak bylo zjištěno, že i zde tyto jsou deformace jsou projevem a důsledkem roztlačení podloží – obr. 20. Svahová deformace vykazuje obdobný kompaktní pohyb jako v případě předchozího profilu. Přítomnost smykové plochy také na tomto profilu i po sanaci, umocňuje domněnku o neefektivní formě sanace.



Obr. 20: Detail přetvoření přítěžovací lavice na profilu č. 2, deformace zvětšeny 25x

Smyková plocha je v tomto případě ostře vymezena převážně v horní části svahu. Skokový nárůst přetvoření je opět na rozhraní kvartérních a oslabených neogenních vrstev. Stejně jako v případě prvního profilu, i tady v horní a dolní části sesuvu dochází spíše k pozvolnému přetváření.

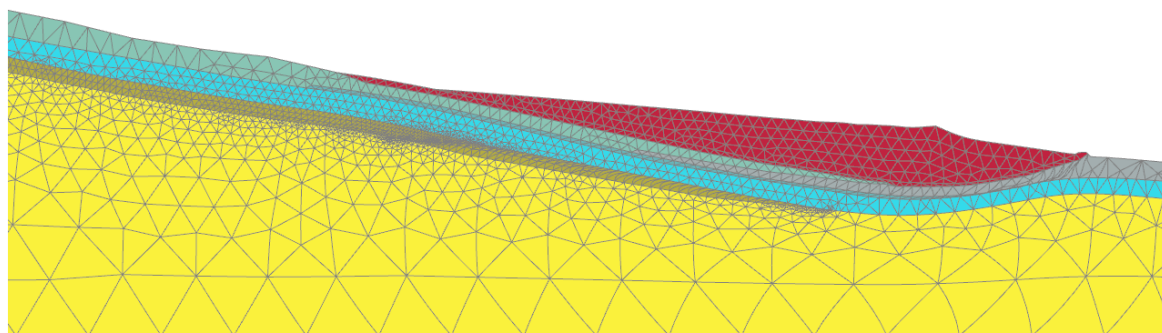
Pórové tlaky jsou i zde v první fázi rozloženy rovnoměrně, s výjimkou pískovcových poloh, kde pórový tlak dosahuje extrémních hodnot přes 900 kN/m<sup>2</sup>. V případě nesanovaného svahu dosahuje pórový tlak ve většině plochy profilu hodnot mezi -100 kN/m<sup>2</sup> a 100 kN/m<sup>2</sup>. Stejně jako v předchozím profilu i v tomto případě došlo po přitížení a odvodnění k mírnému nárustu pórového tlaku pod tělesem násypu.

Čerpání smykové pevnosti je v celém modelovaném masívu dosti vysoké. Zlepšení situace v tomto případě není tak výrazné a týká se jen některých oblastí. Ke zlepšení došlo především v části předkvartérního podloží v dolní části svahu. Největší je snížení čerpání smykové pevnosti v písčitých a šterkových vrstvách pod přítěžovací lavicí. Znovu nedošlo k významnému omezení výskytu plastických bodů. Tahové poruchy jsou lokalizovány pouze na temeni svahu, velmi dobře tak napodobují porušení skutečného svahu. Po přitížení paty svahu je patrná změna polohy plastických bodů. Nedochází již k jejich propagaci na povrch, nýbrž zasahují hlouběji do svahu.

### **6.2.3. Podrobná analýza výsledků na profilu č. 3**

Poslední profil č. 3 vykazuje na rozdíl od ostatních mírně odlišné chování. Největší hodnota posunu v rámci modelu je 16,99 cm. Po fázi sanace došlo k nepatrnému zmenšení posunů na přibližně 15 cm. Stejně jako u ostatních profilů, je i v tomto případě dominantní horizontální složka pohybu. Výrazné je též přetvoření násypu lavice (obr. 21), které dosahuje v maximu 20,34 cm a je opět zapříčiněno deformací podloží. Oproti předchozím profilům, svahový pohyb zde nevykazuje onen kompaktní pohyb celého bloku zeminy. Největší deformace jsou poměrně ostře vymezeny v oblasti odlučné hrany a níže na svahu se postupně vytrácejí.





Deformed mesh |u| (scaled up 25,0 times)  
Maximum value = 0,2034 m (Element 3011 at Node 60634)

Obr. 21: Deformace přítěžovací lavice na profilu č. 3, způsobené neúnosným podložím, zvětšeno 25x

Smyková plocha je zde ostře vymezena pouze v nejvrchnější části svahu v blízkosti odlučné hrany. Níže se gradient přetvoření na smykové ploše snižuje a deformace se projevují i hlouběji v neogenním podloží. Poloha smykové plochy je však jako v předchozích případech v blízkosti rozhraní kvartérních a neogenních vrstev.

Pórové tlaky jsou první fází rozloženy velmi rovnoměrně. V případě nesanovaného svahu nevybočují z intervalu hodnot od  $-70 \text{ kN/m}^2$  do  $70 \text{ kN/m}^2$ . Tento užší rozptyl je způsoben rozdílnou, propustnější stavbou svahu. V další fázi přetížení svahu dochází ke znatelnému nárůstu pórových tlaků. Extrémní hodnota pod přítěžovací lavicí je  $225,3 \text{ kN/m}^2$  (tj. nárůst přes  $150 \text{ kN/m}^2$ ). Je třeba ale zdůraznit, že plastický výpočet chování svahu nezohledňuje vliv času a hodnoty tlaků se budou časem snižovat, až dosáhnou původní úrovně.

Čerpání smykové pevnosti je jako ve všech případech vysoké v horní části svahu a kvartérních pokryvech. Zlepšení situace po sanaci je v tomto případě nejvýraznější ve vrstvách pod přítěžovací lavicí. V horní části svahu navíc došlo k mírnému omezení výskytu plastických bodů a tahových porušení. Zároveň ale došlo k vytvoření nových poruch v oblasti pod násypem. Lokalizace jednotlivých poruch je obdobná jako ve skutečnosti.

### 6.3. Zhodnocení výsledků

Výhodou řešení analýzy svahu metodou konečných prvků je jednoznačně vyšší vypovídající schopnost. Výpočtem lze skutečně až velmi věrně napodobit chování svahu na zájmové lokalitě. Následně řešení podává kvantitativní informace o napětí a přetvoření svahu. Zvláště důležitá je přitom znalost rozložení hledaných veličin v masívu. Zároveň se však ukázalo jako nespolehlivé, brát vypočtené hodnoty posunů (a tedy i vyvolaného napětí a tlaků) za správné a přesné výsledky. Ačkoliv model dokázal dobře vystihnout chování masívu a polohu nestabilních vrstev, výsledné hodnoty jsou pouze orientační. Zároveň kvůli této nepřesnosti, která může být částečně způsobena snad až příliš komplikovanou geologickou stavbou modelu, nebyla provedena stabilitní analýza redukcí  $\phi$ -c. Jednoznačnou nevýhodou tohoto konkrétního případu je tedy nevyšetření stupně stability metodou MKP.

Výpočet MKP však potvrdil sníženou stabilitu svahu a rozvoj významných, byť nereálných deformací. Z výsledků rovněž vyplývá reálná situace tahového porušení v horní strmější části svahu, kde se rovněž projevují relativně největší deformace. Spodní část svahu oproti tomu celý svah spíše stabilizuje a deformace v této části jsou minimální. Hodnoty čerpání smykové pevnosti, mnohdy dosahující hodnoty 1,0, poukazují na nadměrné zatížení nejen kvartérních vrstev, ale i neogenního podloží. Přítomnost plastických bodů v masívu pak svědčí o přítomnosti smykové plochy ve všech zkoumaných profilech. Sanačními opatřeními došlo ke znatelnému zmenšení deformací a omezení tvorby plastických oblastí. Na svahu i přesto došlo k vytvoření smykové plochy a významným deformacím. Důsledkem přetížení došlo v podloží násypu ke zvýšení pórových tlaků. Toto mírné zvýšení pórových tlaků je však dočasné a zjevně neohrožuje stabilitu svahu.

## 7. Srovnání výsledků řešení silovými metodami a MKP

Srovnávání, která z metod analýzy chování rizikového svahu je vhodnější či důležitější není na místě. Minimálně při řešení tohoto konkrétního problému bych se neobešel bez obou přístupů. Řešení metodou mezní rovnováhy potvrzuje nestabilitu svahu v krajních situacích. Zároveň dává reálnou možnost stabilizace svahu pomocí přetížení a odvodnění. MKP naproti tomu pomáhá vytvořit si přesnější a ucelenější představu o chování masívu jako celku. Výpočet opírající se o pozorované projevy in-situ některá zjištění potvrzuje, zatímco jiné závěry a výsledky předchozího řešení zpochybňuje. Ani jedna

metoda není neomylná a závisí na přístupu a zkušenosti řešitele. Proto v tomto případě není jedna metoda bez druhé průkazná, dohromady však pomáhají lépe porozumět procesům, které na zájmové lokalitě probíhají.

### 7.1. Zhodnocení řešení metodou mezní rovnováhy

Výpočtem metodou mezní rovnováhy bylo zjištěno, že za specifických podmínek svah vykazuje nízkou stabilitu. Tohoto chování bylo dosaženo použitím nižších, obvyklejších hodnot reziduální pevnosti některých zemin. Laboratorně zjištěné hodnoty se totiž zdají nadsazené a opakovaným výpočtem stability svahu bylo zjištěno, že výrazně přispívají ke stabilitě svahu. Obrácením této úvahy však lze tvrdit, že v případě i malých deformací, vyvolaných např. při srážkových epizodách během roku, které mohou být příčinou snížení smykových parametrů, výrazně snižují stabilitu svahu. Po odeznění těchto vlivů se smyková pevnost opět zvyšuje a svah se částečně stabilizuje.

Sanační opatření spočívající v přitížení paty svahu násypem z hlusiny a odvodněním se zdá jako dostatečné řešení. Výpočet prokázal zvýšení stability svahu až nad požadovanou hodnotu  $F_s > 1,3$ . Výpočet však nebyl schopen ověřit chování svahu, jako rozsah a lokalizaci deformací, smyková napětí nebo pórové tlaky.

### 7.2. Zhodnocení řešení MKP

Analýza svahu řešená metodou konečných prvků věrně simuluje chování rizikového svahu. Jsou prokázány největší deformace v oblasti odlučné hrany svahové nestability i vznik tahových porušení, tzv. zátrhů. Při výpočtu byly použity znatelně vyšší reziduální parametry zemin, zejména z důvodu nutnosti zajistit „stabilitu“ modelu během výpočtu. I přesto jsou však tyto parametry výrazně nižší než z laboratorně zjištěné hodnoty. Zjištěné hodnoty posunů proto neodpovídají skutečnosti. Jejich důležitost spočívá ve znalosti jejich polohy a rozložení. Interpretací těchto výsledků lze dále odečíst polohu a tvar smykové plochy. Tohle vše jsou pak výhody oproti řešení silovými metodami, kde výsledek přímo závisí na určení smykové plochy uživatelem.

Výpočtem byla především zjištěna možnost nedostatečné účinnosti sanačních opatření. Příčinou, jak se ukázalo, je poloha smykové plochy, která v žádném z řešených případů nedosahuje do oblasti násypu přitěžovací lavice. Navíc odvodnění při tomto řešení nemá žádný prokazatelný vliv na stabilitu svahu, oproti řešení v Geo5. Zde může být důvodem změna napětí v masívu související s jeho přetvořením od přitížení.

## 8. Srovnání výsledků s pozorováním monitoringu

Hloubka smykové plochy je ve všech řešených profilech předurčena polohou oslabených jílových zemin. I přesto došlo u všech řezů k propagaci smykové plochy na povrch ve stejné oblasti svahu. Lze tedy předpokládat pravděpodobné vytvoření odlučné hrany již na základě modelové situace. V blízkosti odlučné hrany svahové nestability proběhlo v roce 2017 a 2018 přesné měření rozvoje deformací na pevně založených opěrách [4].

Tab. 4: Zaznamenané posuny na odlučné hraně, převzato ze zpráv K-GEO, s.r.o.

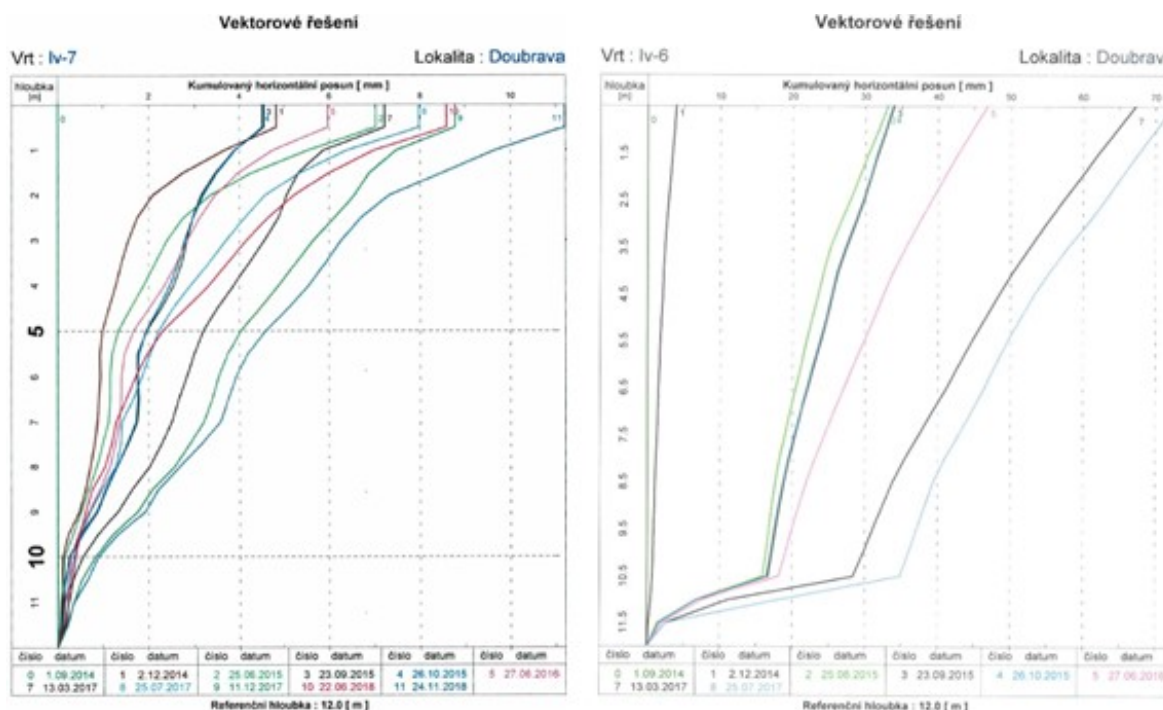
Označení měř. Profilu	Měření mezi 9.2017 a 12.2017		Měření mezi 12.2017 a 11.2018	
	Horiz. posun	Vert. posun	Horiz. posun	Vert. posun
MO 1	0,107 m	0,535 m	0,352 m	0,343 m
MO 2	0,163 m	0,255 m	0,241 m	0,093 m

Jak je patrné z naměřených hodnot, výpočtené hodnoty deformací v oblasti odlučné hrany jsou jen velmi přibližné. Model bohužel navíc nesprávně předpokládá pouze výrazné horizontální posuny oproti vertikálním. Z hodnot je navíc zřejmá silná sezónní závislost, neboť posuny během 3-měsíčního období v roce 2017 jsou výraznější než během následujících 11 měsíců.

Monitoring na lokalitě též sleduje projevy svahové deformace na povrchu terénu. Jsou dokumentovány poruchy pozemních komunikací, vytlačená čela, zátrhy a otevřená ústí. Především přítomnost zátrhů lze ve výpočtu snadno ověřit, neboť jim odpovídají místa tahových porušení modelu. Taková místa jsou přítomna ve všech vyšetřovaných řezech v horní části svahu, po obou stranách předpokládané odlučné hrany.

K-GEO, s.r.o. na svahu rovněž provádí přesné inklinometrické měření. Výsledky měření jednoznačně potvrzují přítomnost smykové plochy na svahu v hloubkách mezi 5 m a 10 m p.t. [4] [12] [13] [11] [10] Přesná hloubka smykové plochy je závislá na konkrétním geologickém profilu, takže se výrazně mění vrt od vrtu. Některé inklinometrické vrty však vykazují spíš creepové pohyby, či dokonce pouhý náklon měrného stvolu. Ve všech případech jsou však maximální kumulované posuny pouze v jednotkách cm, v některých objektech dokonce jen mm. Tyto deformace jsou přitom za celé sledované období – tj. v někdy i více než 10 let, většinou pak kolem 5 let. Názornější je proto spíš rychlost deformace, která je maximálně v jednotkách mm za rok. Výsledky modelování deformace

svahu jsou tedy nadhodnoceny. Inklinometrií je navíc potvrzena smyková plocha i ve spodní části svahu v oblasti dolní pozemní komunikace. Výpočtem zde však nebyly zjištěny žádné posuny a tedy ani smyková plocha. Výsledky MKP tedy rozměry svahové nestability nebezpečně podhodnotily.



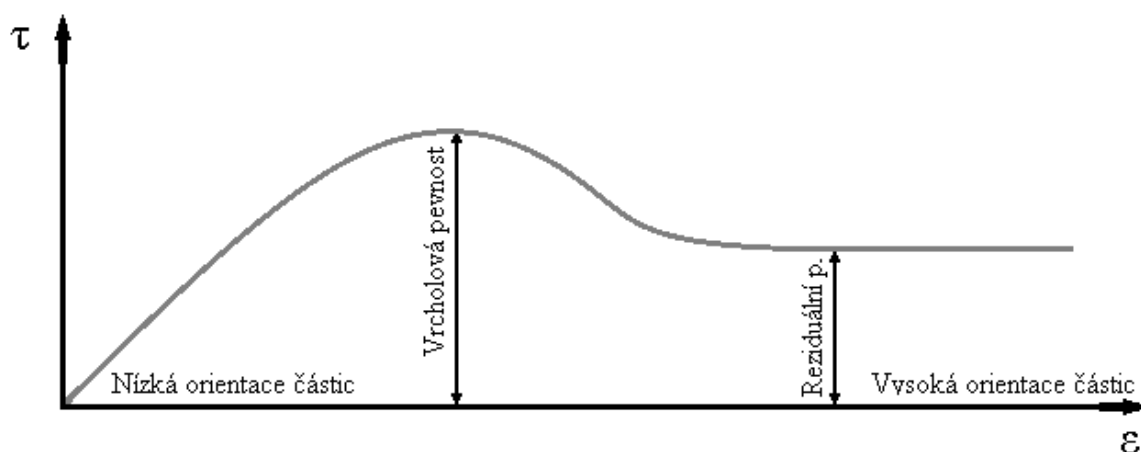
Obr. 22: Srovnání inklinometrického proměření creepového pohybu a sesuvu s vyvinutou smykovou plochou

## 9. Závěr

Práce se zabývá analýzou vývoje svahové nestability v oblasti zátopy Kozinec u Doubravy. Ve výpočtech je důraz kladen na zjištění míry stability, rozsahu svahové deformace a vlivy podněcující sesuv. Za tímto účelem byl vytvořen 3D geologický model širšího území. Z tohoto hrubého modelu byly následně exportovány a interpretovány geologické řezy a inženýrskogeologické modely použitelné při detailnější analýze území a ve výpočtech rovinných úloh. Správnost těchto výstupů však nelze spolehlivě ověřit, proto je třeba k nim i k výsledkům zjištěných jejich pomocí přistupovat kriticky.

Výsledky potvrdily původní nízkou stabilitu svahu s výraznými deformacemi především v horní části svahu. Tato snížená stabilita je důsledkem velmi nízkých parametrů smykové pevnosti na rozhraní kvartérních a neogenních vrstev. Tyto hodnoty jsou v případě výpočtu silovými metodami v podstatě reziduálními parametry na aktivní smykové ploše. V případě MKP jde spíše o hodnoty povrcholové pevnosti – viz obr. č. 23. Smyková pevnost

zemin totiž závisí především na orientaci částic, a tedy i přetvoření. Výsledné oslabení tedy závisí na velikosti prvotní deformace svahu, která překročí vrcholovou pevnost. Z toho plyne, že výpočet metodou mezní rovnováhy již od začátku předpokládal menší deformace na smykové ploše. Příčin, které mohou svah deformovat a zatěžovat až k překročení vrcholové smykové pevnosti může být více. Může jít např. o: extrémní srážky, saturace vodou ze zátopy, nebo přeskupení napětí od poklesu terénu. Identifikace nejpravděpodobnějšího triggeru svahové nestability však není předmětem této práce.



Obr. 23: Obecný vývoj smykové pevnosti zemin v závislosti na přetvoření

Dalším výsledkem řešení bylo opodstatněno odvodnění oblasti pod svahem. Byť metodou konečných prvků nebyl vliv odvodnění zřejmý, řešením pomocí Geo5 bylo prokázáno znatelné zvýšení stability svahu. Rozdíl výsledků obou metod je zřejmě způsoben odlišným průběhem smykové plochy, kterou výpočet MKP výrazně podhodnotil. Zvýšení stability po odvodnění paty svahu je asi o 10 %. Bez tohoto zvýšení stability není svah spolehlivě stabilní.

Modelování situace kompletní sanace, tj. přetížení i odvodnění jednoznačně potvrzuje zvýšení stability svahu. V případě softwaru Geo5 dokonce spolehlivě nad hranici  $F_s = 1,3$ . Výsledky plastického výpočtu MKP, třebaže nejsou natolik přesvědčivé, přesto také potvrzují zvýšení stability svahu. Za nepřesnými výsledky modelování MKP může být několik příčin, např.: mylná interpretace horninového masivu v geologickém řezu, či nezkušný, chybný výběr a výpočet získaných parametrů zemin. K dosažení odlišného chování modelu by proto zřejmě bylo potřeba upravit vstupní geologický řez, a tudíž i inženýrskogeologický model.

Podle výsledků modelování zájmového svahu, by měl probíhající monitoring v budoucnu zjistit snížení deformací v horní části svahu. Inklinometrické měření pod svahem a v oblasti přítěžovací lavice naopak mohou zaznamenat nové deformace. Především v přípovrchových jílovitých zeminách může dojít k přetváření od přetížení novým násypem. Hydrogeologický monitoring by se měl zaměřit na ověření snížení HPV. V případě nedostatečného snížení HPV totiž nemusí být sanační opatření účinná.

Zabezpečování a sanace svahových pohybů přetížením v patě svahu je nejčastější formou protiopatření. Avšak v případě neúčinnosti současných sanačních opatření a zjištění pokračujících deformací, bude třeba realizovat jiná opatření. Zřejmě nejvýhodnějším dalším řešením bude odlehčení svahu, spočívající v částečném odtěžení horní části svahu [17]. Vhodná by taky byla sanace zátrhů na svahu, které mohou saturovat vrchní vrstvy. Zde by šlo zřejmě jen o vyplnění otvorů málo propustnými zeminami jako např. jíly, nebo ideálně bentonitem, který lépe utěsni všechny záhyby.

## 10. Seznam obrázků

Obr. 1: Zájmová lokalita v letech 2012 a 2019.....	10
Obr. 2: Mapa poddolování a důlních děl .....	11
Obr. 3: Výkres realizovaného monitoringu svahové nestability.....	13
Obr. 4: Poloha všech vrtů na podkladu leteckých map.....	18
Obr. 5: Princip proužkových metod.....	21
Obr. 6: Ukázka řešení stability svahu pomocí MKP .....	22
Obr. 7: Výběr vrtů pro tvorbu inženýrskogeologického řezu .....	28
Obr. 8: Ukázka podoby profilu č. 2 po exportu, před interpretací .....	29
Obr. 9: Inženýrskogeologický model profilu č. 1 .....	30
Obr. 10: Inženýrskogeologický model profilu č. 2 .....	31
Obr. 11: Inženýrskogeologický model profilu č. 3 .....	32
Obr. 12: Grafické vyšetření ( $\varphi$ ) a (c) .....	33
Obr. 13: Ukázka modelu IG řezu č. 2, situace bez sanace.....	39
Obr. 14: Ukázka modelu IG řezu č. 2, situace pouze přetížení .....	40
Obr. 15: Ukázka modelu IG řezu č. 2, situace přetížení i odvodnění.....	41
Obr. 16: Úplná geometrie profilu č. 2.....	43
Obr. 17: Největší deformace před sanací na profilu č. 1 .....	45
Obr. 18: Deformace na profilu č. 1 po sanaci.....	45
Obr. 19: Detail přetvoření vzniklých přetížením na profilu č. 1 .....	46
Obr. 20: Detail přetvoření přítěžovací lavice na profilu č. 2 .....	47
Obr. 21: Deformace přítěžovací lavice na profilu č. 3.....	49
Obr. 22: Srovnání inklinometrického měření .....	53
Obr. 23: Obecný průběh smykové pevnosti zemin.....	54



## 11. Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled charakteristik převzatých z laboratorních protokolů K-GEO, s.r.o.....	34
Tab. 2: Přehled charakteristik použitých při modelování v softwaru Plaxis 2D .....	36
Tab. 3: Přehled charakteristik použitých při modelování v softwaru Geo5 .....	37
Tab. 4: Zaznamenané posuny na odlučné hraně, převzato ze zpráv K-GEO, s.r.o. ....	52

## 12. Seznam příloh

Příloha č. 1: Geologický řez č. 1, (výkres)	
Příloha č. 2: Absolutní posuny na profilu č. 1	
Příloha č. 3: Horizontální posuny na profilu č. 1	
Příloha č. 4: Vertikální posuny na profilu č. 1	
Příloha č. 5: Čerpání smykové pevnosti na profilu č. 1	
Příloha č. 6: Plastické body a tahová porušení na profilu č. 1	
Příloha č. 7: Pórové tlaky na profilu č. 1	
Příloha č. 8: Geologický řez č. 2, (výkres)	
Příloha č. 9: Absolutní posuny na profilu č. 2	
Příloha č. 10: Horizontální posuny na profilu č. 2	
Příloha č. 11: Vertikální posuny na profilu č. 2	
Příloha č. 12: Čerpání smykové pevnosti na profilu č. 2	
Příloha č. 13: Plastické body a tahová porušení na profilu č. 2	
Příloha č. 14: Pórové tlaky na profilu č. 2	
Příloha č. 15: Geologický řez č. 3, (výkres)	
Příloha č. 16: Absolutní posuny na profilu č. 3	
Příloha č. 17: Horizontální posuny na profilu č. 3	
Příloha č. 18: Vertikální posuny na profilu č. 3	
Příloha č. 19: Čerpání smykové pevnosti na profilu č. 3	
Příloha č. 20: Plastické body a tahová porušení na profilu č. 3	
Příloha č. 21: Pórové tlaky na profilu č. 3	

### 13. Seznam literatury

- [1] KLIMEŠ, J. a I. BAROŇ. Investigation of recent catastrophic landslides in the flysch belt of Outer Western Carpathians (Czech Republic): progress towards better hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2009, **2009**(9), 119-128.
- [2] KREJČÍ, O. a I. BAROŇ. Slope movements in the Flysch Carpathians of Eastern Czech Republic triggered by extreme rainfalls in 1997: a case study. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2002, **2002**(27), 1567-1576.
- [3] SVÁROVSKÝ, Marek. *Využití odporové tomografie pro zhodnocení horninového prostředí na svazích náchylných k sesouvání*. Ostrava, 2018. Bakalářská práce. VŠB-TUO. Vedoucí práce Doc. RNDr. Pavel Pospíšil, Ph.D.
- [4] KOVÁŘ, Luděk a Pavel MALUCHA. *Doubrava - Dětmárovice, Geotechnický monitoring stability svahové fronty Ujala: Roční svodná zpráva*. Ostrava, 2018.
- [5] STARK, T. a D. RUFFING. Selecting Minimum Factors of Safety for 3D Slope Stability Analyses. In: *Geo-Risk* [online]. Urbana: University of Illinois, 2017, s. 259 - 266 [cit. 2019-11-26]. DOI: 10.1061/9780784480700.025.
- [6] FUSSGÄNGER, Egon. *Svahové pohyby a poruchy a ich geomechanické posudzovanie*. 1. Bratislava: JAGA GROUP, 2016. ISBN 978-80-8076-124-0.
- [7] PAŠEK, Jaroslav a Milan MATULA. *Inženýrská geologie*. Praha: [s.n.], 1995. Česká matice technická, č. spisu 452, roč. 97 (1993).
- [8] BÍNA, Jan a Jaromír DEMEK. *Z nížin do hor: geomorfologické jednotky České republiky*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2012. ISBN 978-80-200-2026-0.
- [9] BALATKA, Břetislav a Jaromír DEMEK, ed., Peter MACKOVČIN, ed. *Zeměpisný lexikon ČR* [CD-ROM]. Vyd. 2. Brno: AOPK ČR, 2006. ISBN 80-86064-99-9.
- [10] KOVÁŘ, Luděk a Pavel MALUCHA. *Doubrava-Dětmárovice Geotechnický monitoring stability svahové fronty Ujala: Roční svodná zpráva*. GreenGas, 2014.

- [11] KOVÁŘ, Luděk a Pavel MALUCHA. *Doubrava-Dětmarovice Geotechnický monitoring stability svahové fronty Ujala: Roční svodná zpráva*. GreenGas, 2017.
- [12] KOVÁŘ, Luděk a Pavel MALUCHA. *Doubrava - Dětmarovice, svahová fronta ujala, průzkum čela sesuvu: Závěrečná zpráva*. Ostrava, 2018.
- [13] KOVÁŘ, Luděk a Cuadros TOMMHY. *Doubrava - Svahová fronta ujala: doplnění monitorovacího systému*. Ostrava, 2018.
- [14] KAJZAR, Vlastimil a Lubomír STAŠ. *Výšková měření v severní oblasti dobývacích prostorů Doubrava a Karviná Doly I v roce 2018: Závěrečná zpráva ke smlouvám o dílo*. Ostrava, 2018.
- [15] HRUBEŠOVÁ, Eva. *Modelování v geotechnice* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, b.r. [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/predmety/modelovani-v-geotechnice/studijni-materialy/podklady-pro-prednasky/>
- [16] VRTEK, František. *Mechanika zemin: Inženýrská geologie a hydrologie v praxi*. Brno, 1998.
- [17] ZÁRUBA, Quido a Vojtěch MENCL. *Sesuvy a zabezpečování svahů*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1969.

## 14. Seznam internetových zdrojů

*Česká geologická služba* [online] Praha [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet>

*Geoportál ČÚŽK* [online] Praha 8, [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(jr5m2imkwqevba53pcpjtcrs\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=uvod\\_uvod&head\\_tab=sekce-00-gp&menu=01&news=yes](https://geoportal.cuzk.cz/(S(jr5m2imkwqevba53pcpjtcrs))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=uvod_uvod&head_tab=sekce-00-gp&menu=01&news=yes)

*Mapy.cz* [online]. Praha, [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>

*Hydroekologický informační systém VÚV TGM* [online] Praha, [cit. 2019-11-19] dostupné z: <https://heis.vuv.cz/>

*Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>

*Fine, stavební software pro statiky a geotechniky* [online]. Praha 6 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/>

*Modelování v geotechnice*. Geotechnici.cz [online]. Ostrava: VŠB-TUO [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/predmety/modelovani-v-geotechnice/studijni-materialy/podklady-pro-prednasky/>

## 15. Seznam použitého softwaru

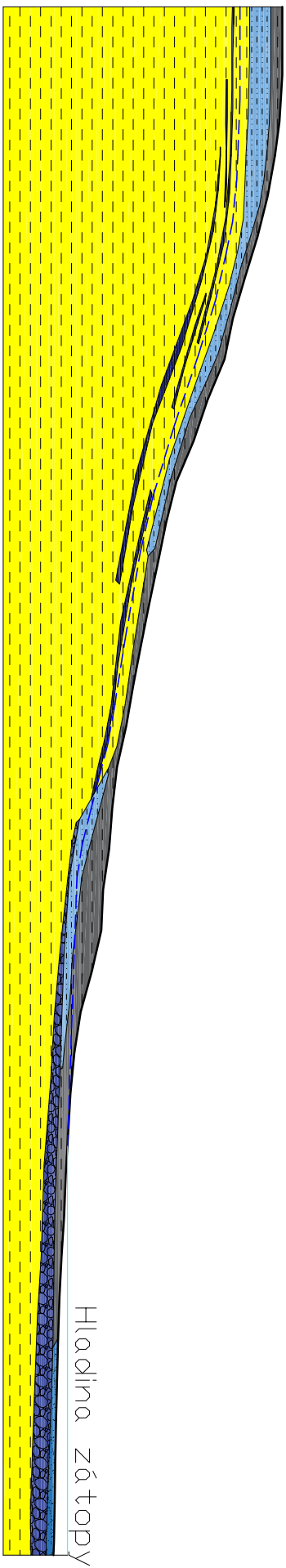
RockWorks [komerční software], verze: RockWorks 17. RockWare inc. Golden CO, USA, [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.rockware.com/>

Geo5 [studentská verze], verze: Geo5 2019. Fine, spol. s.r.o., Závěrka 12, 169 00 Praha 6, Česká republika [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/geotechnicky-software/>

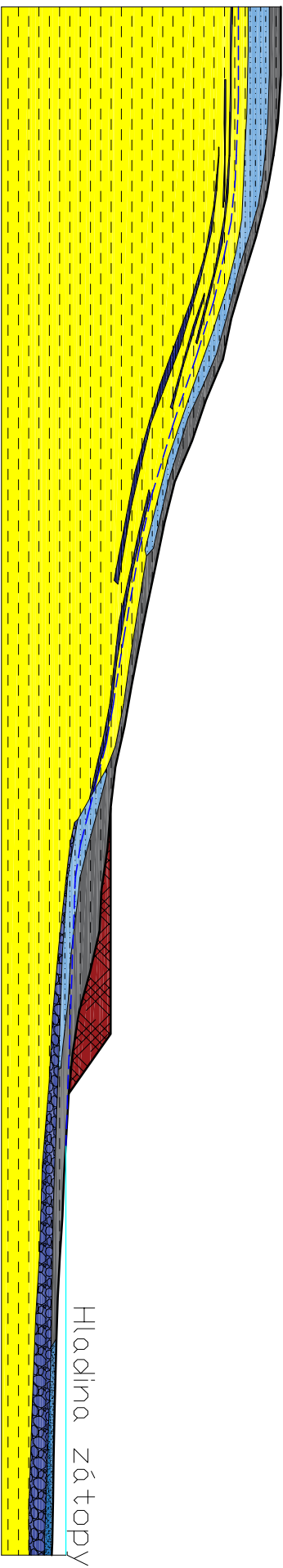
Plaxis 2D [studentská verze], verze Plaxis 2D, P.O. Box 572, 2600 AN Delft, The Netherlands, [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://www.plaxis.com/product/plaxis-2d/>

Google Earth Pro, [freeware verze], Mountain View, Kalifornie, USA [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://www.google.com/intl/cs/earth/>

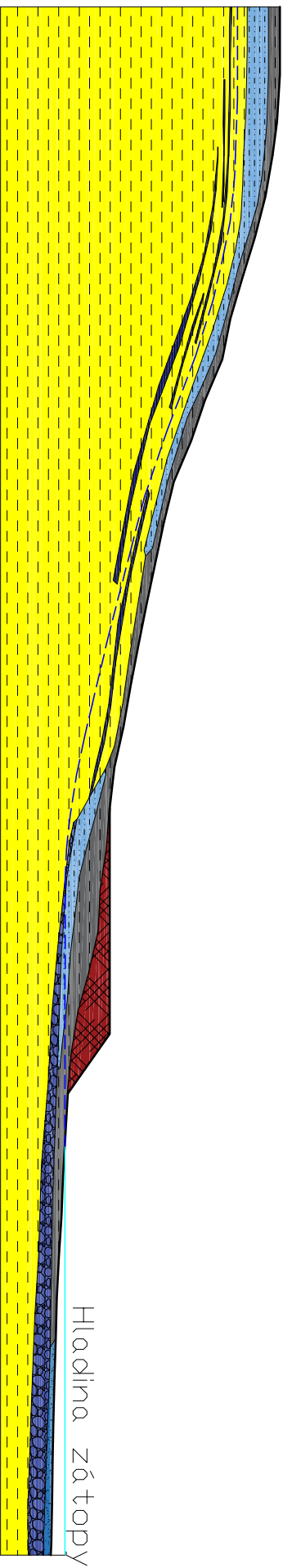
Profil 1, situace před sanací



Profil 1, situace s přitížením




Profil 1, situace s přitížením i odvodněním

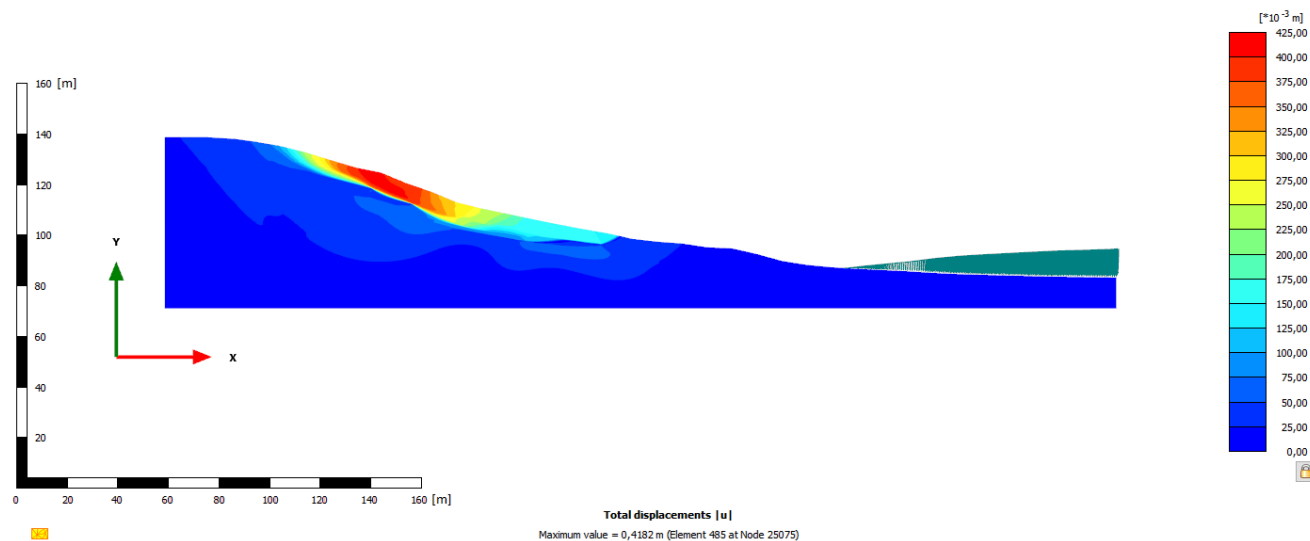


Legenda

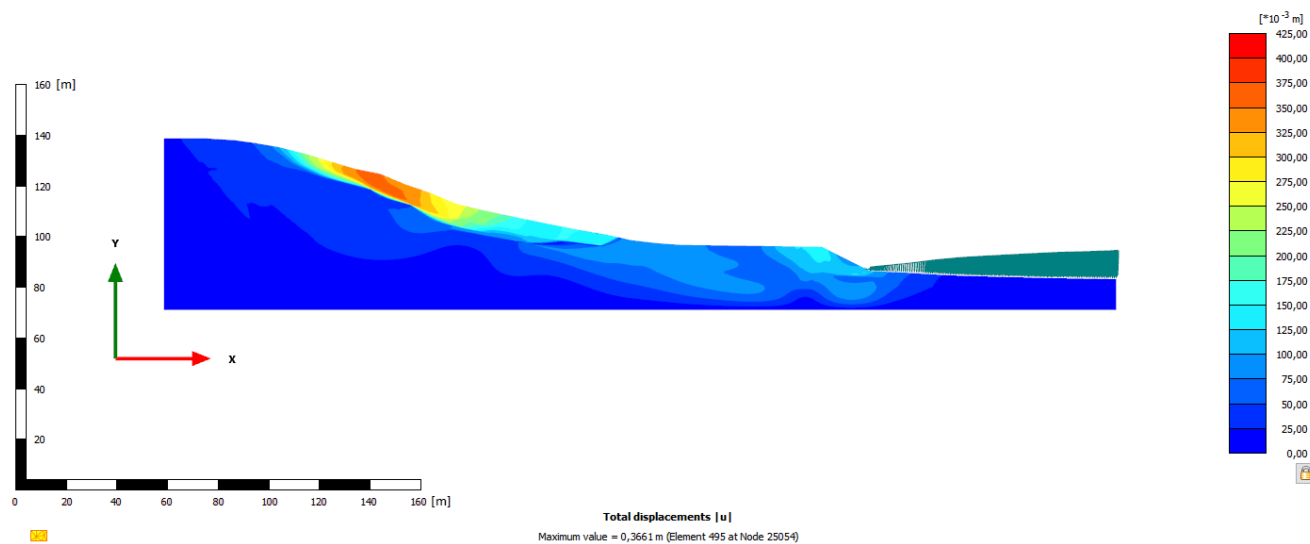
	Jíl F6 (Neogén)
	Jíl F6
	Jíl písčitý F4
	Jíl štěrkovitý F2
	Hlína F5
	Hlína jílovito-písčitá F7
	Písek S1
	Písek jílovitý S5
	Písek hlinitý S4
	Štěrk G1
	Pískovec R3
	Material lavice Y
	HPV

VEDOUCÍ DP		VYPRACOVAL	KONZULTANT DP	<div><b>FAST</b></div> <div>FAKULTA STAVEBNÍ VŠB-TU OSTRAVA</div> <div>KATEDRA GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ</div>	
doc. RNDr. Pavel Pospíšil, PhD.		Bc. Marek Svárovský	Ing. Luďek Kovář, PhD.		
NÁZEV DIPLOMOVÉ PRÁCE					
ANALÝZA VÝVOJE SESUVU V OBLASTI KOZINEC U DOUBRAVY					
NÁZEV VÝKRESU					
GEOLOGICKÝ ŘEZ Č.1				FORMÁT	A3
				DATUM	LISTOPAD 2019
				OBOR	GEOTECHNIKA
				ŠK.ROK	2018/2019
				MĚŘITKO	Č. VÝKRESU
				1:1500	1

## Příloha č. 2: Absolutní posuny na profilu č. 1

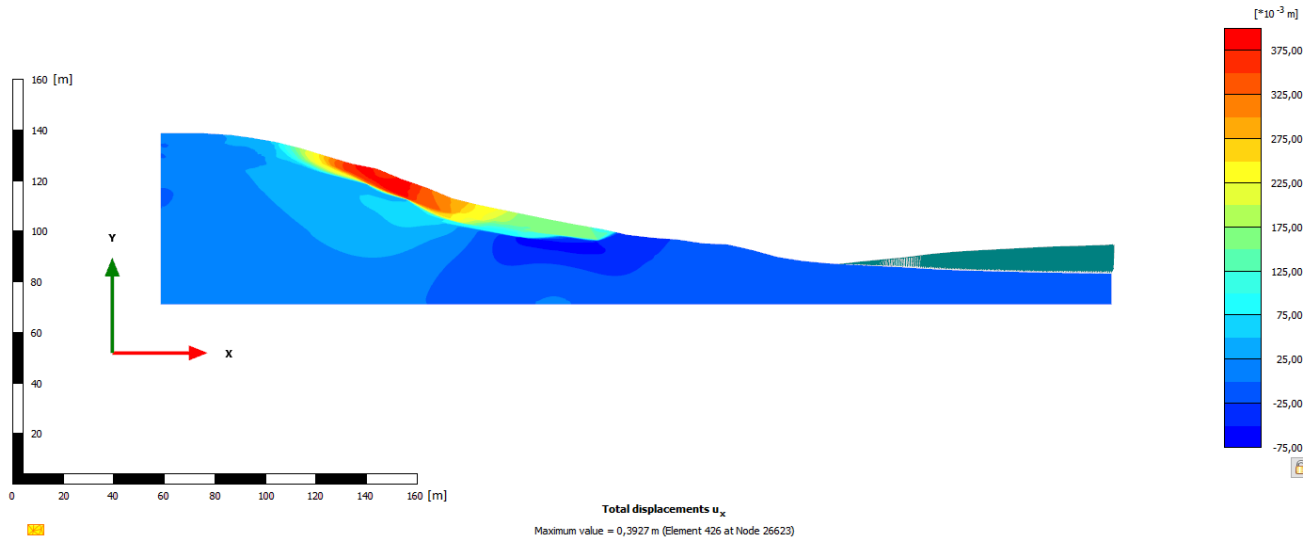


Posuny před sanací

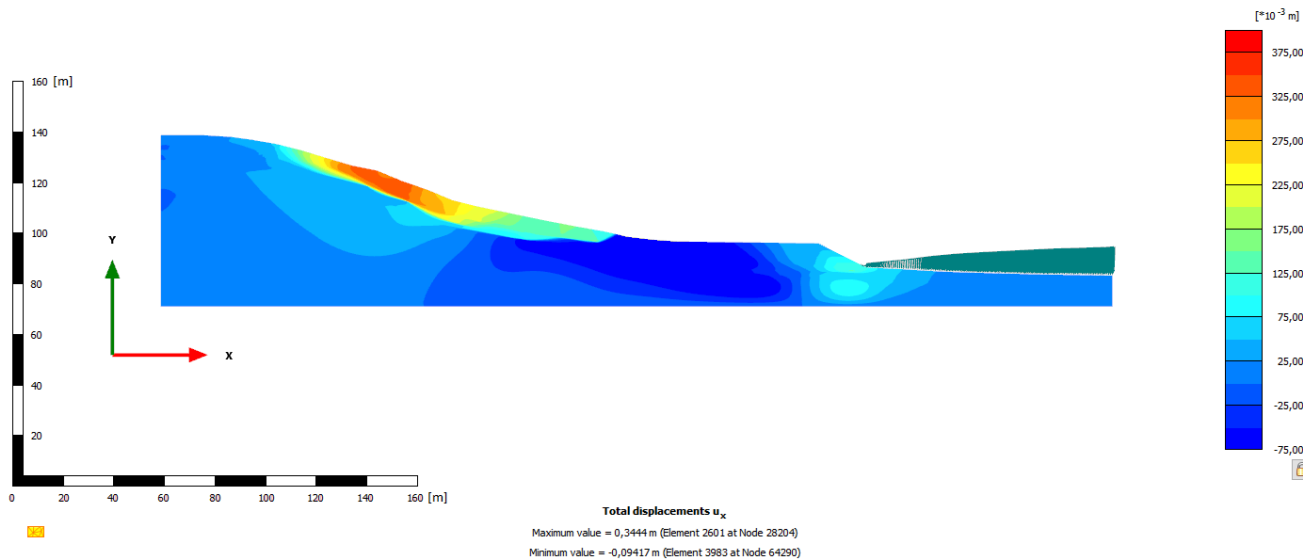


Posuny po sanaci

### Příloha č. 3: Horizontální posuny na profilu č. 1

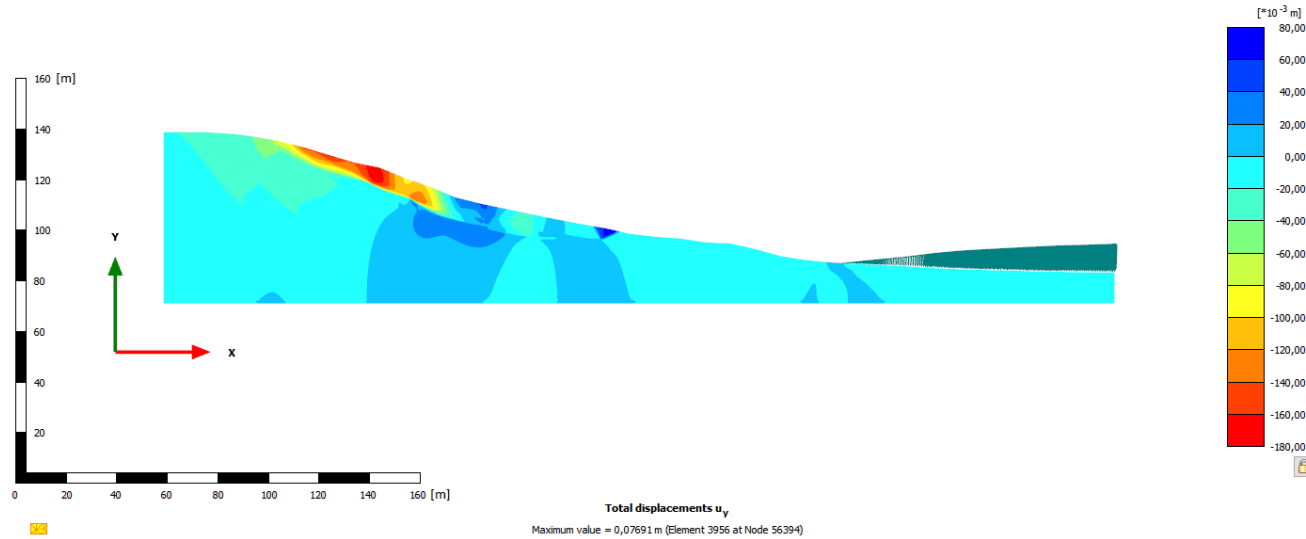


Posuny před sanací

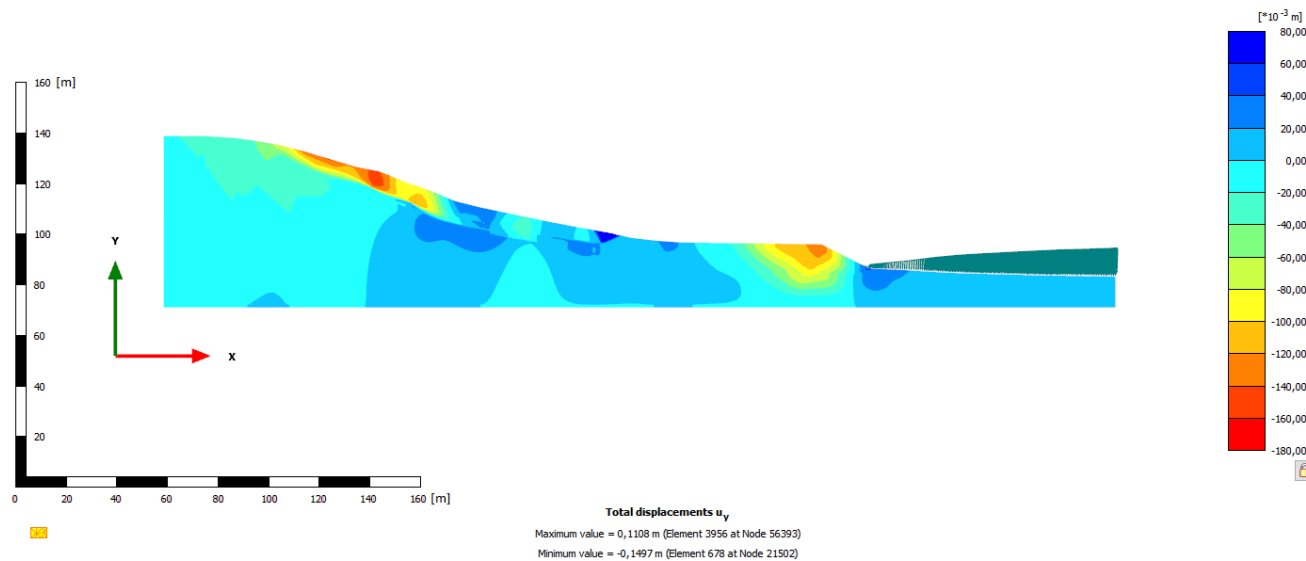


Posuny po sanaci

## Příloha č. 4: Vertikální posuny na profilu č. 1



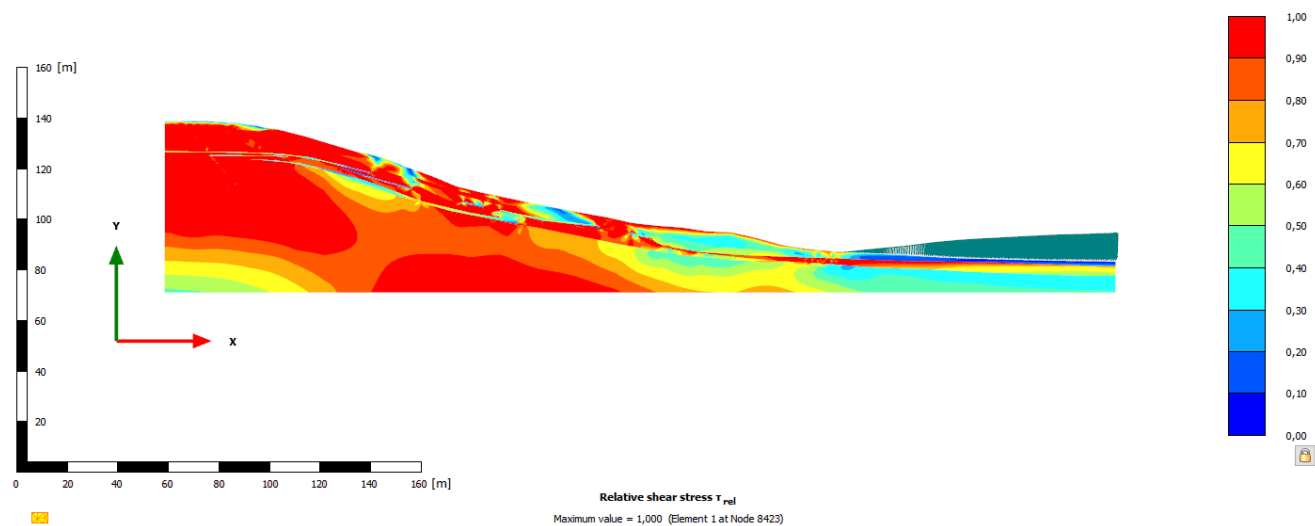
Posuny před sanací



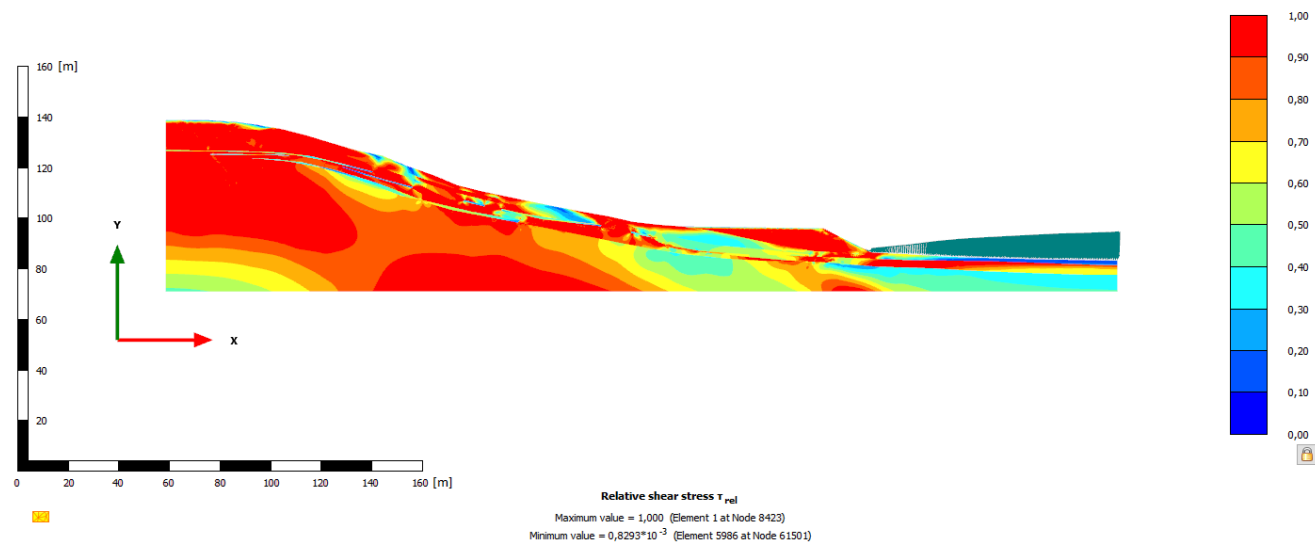
Posuny po sanaci



## Příloha č. 5: Čerpání smykové pevnosti na profilu č. 1

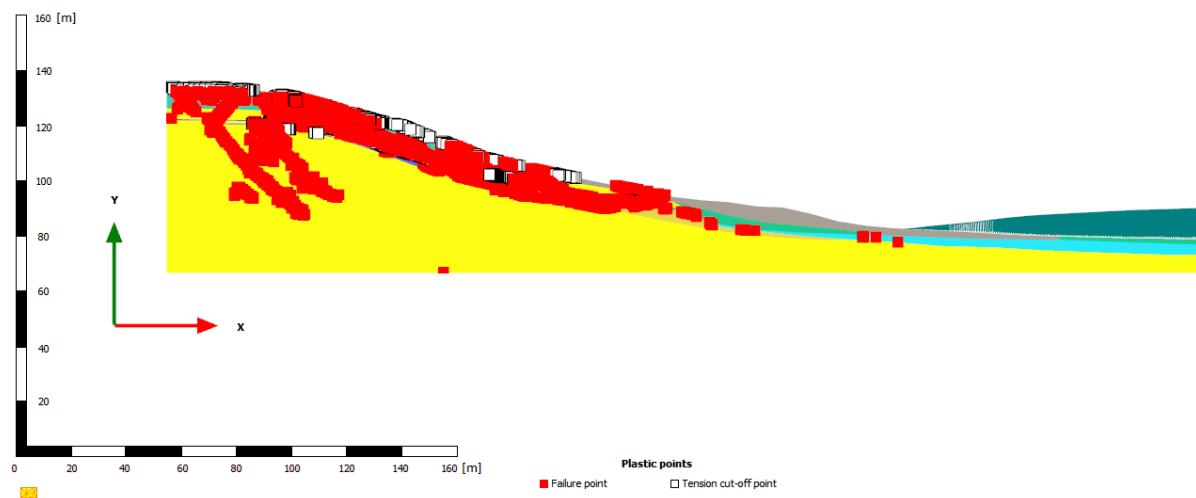


Čerpání pevnosti před sanací

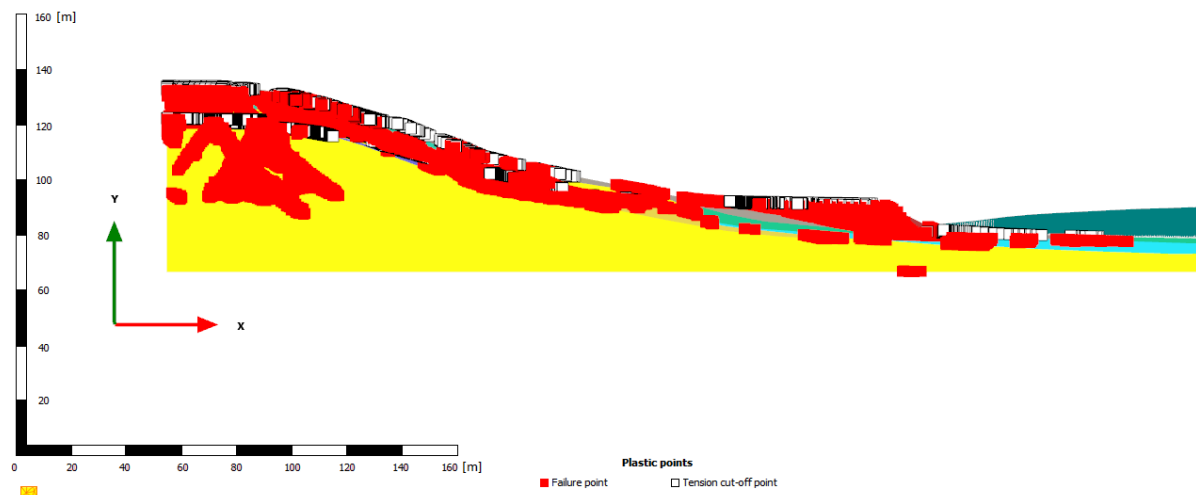


Čerpání pevnosti po sanaci

## Příloha č. 6: Plastické body a tahová porušení na profilu č. 1

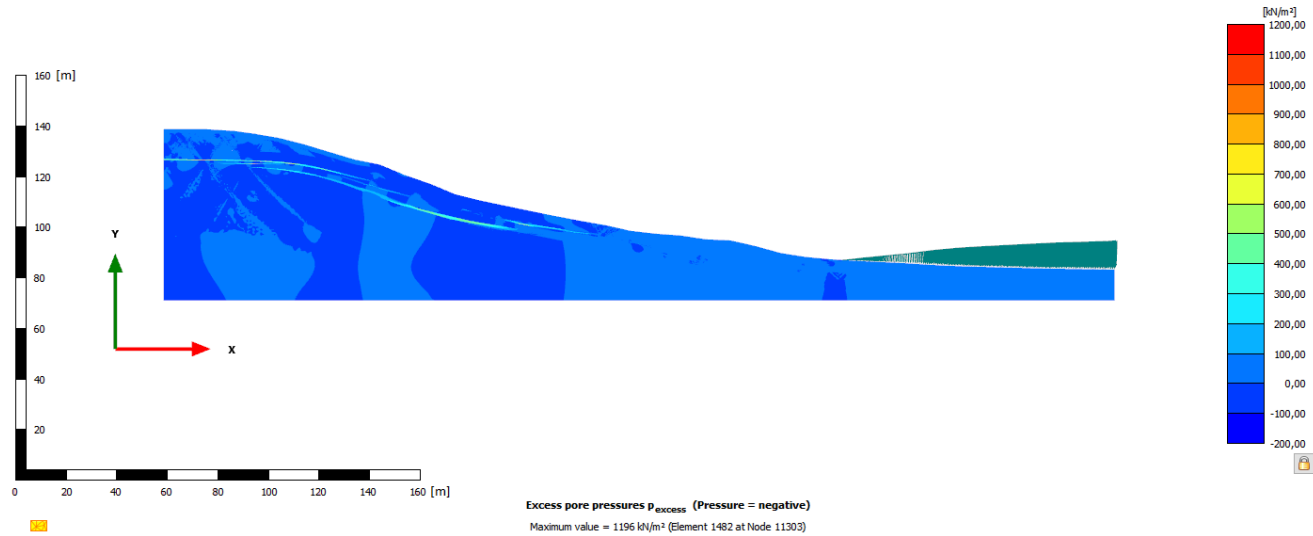


Body porušení před sanací

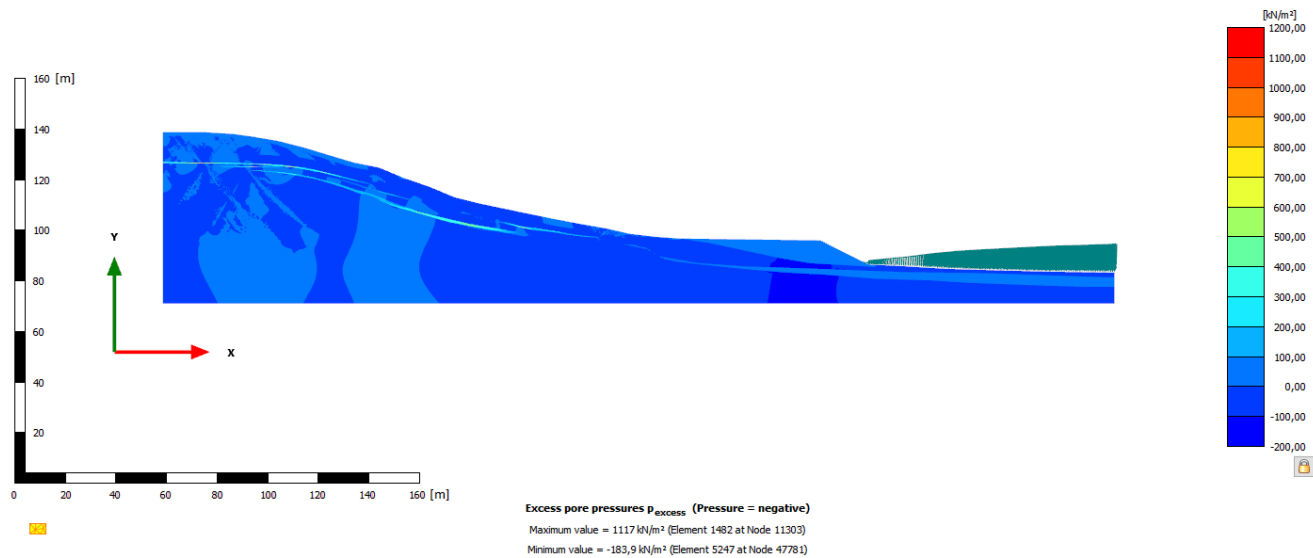


Body porušení po sanaci

## Příloha č. 7: Pórové tlaky na profilu č. 1

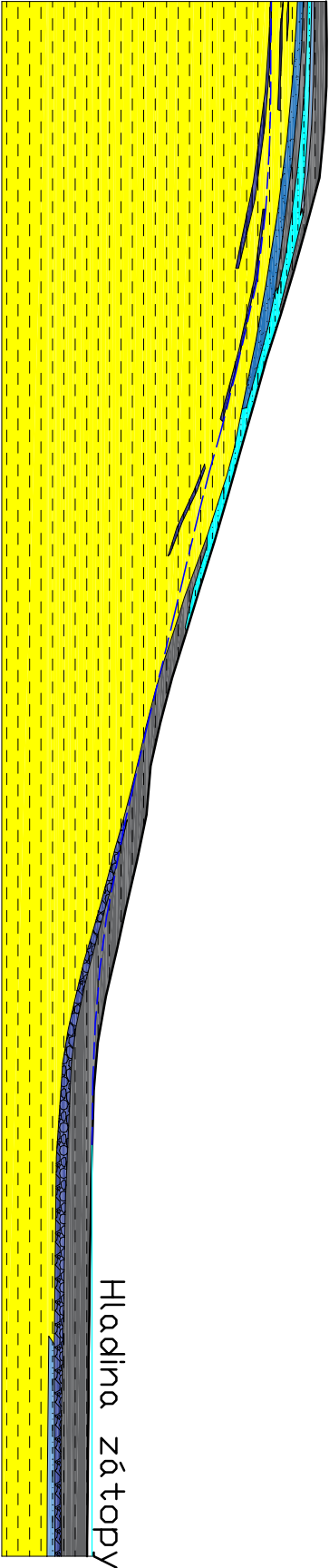


Pórové tlaky před sanací

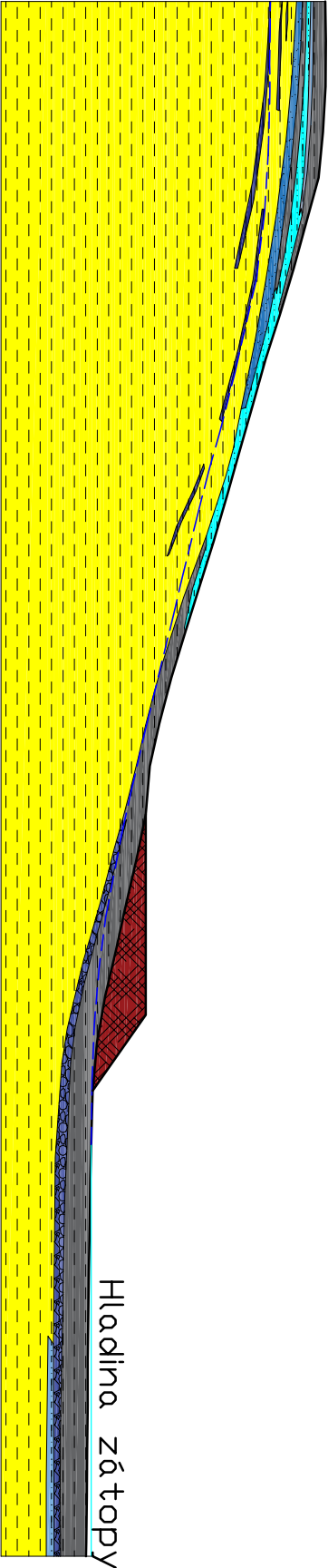


Pórové tlaky po sanaci

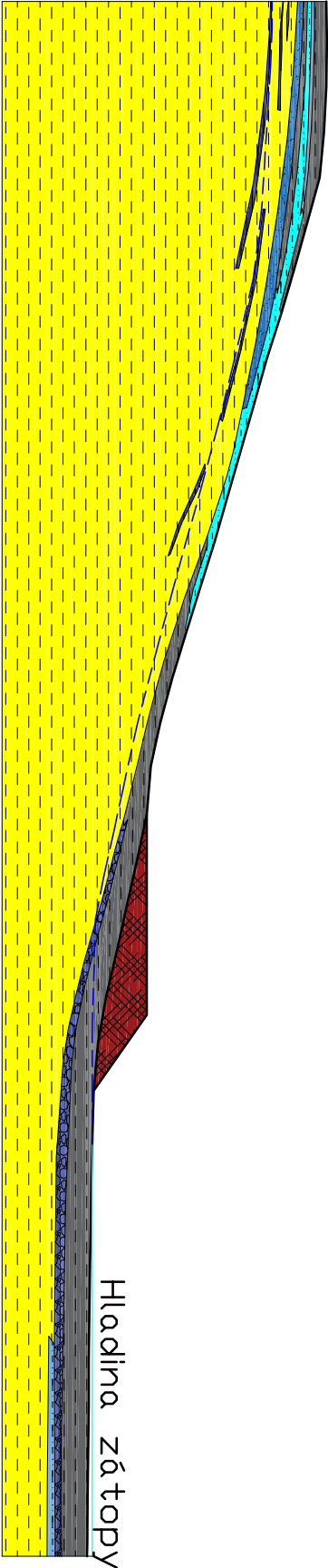
Profil 2, situace před sanací



Profil 2, situace s přitížením




Profil 2, situace s přitížením i odvodněním

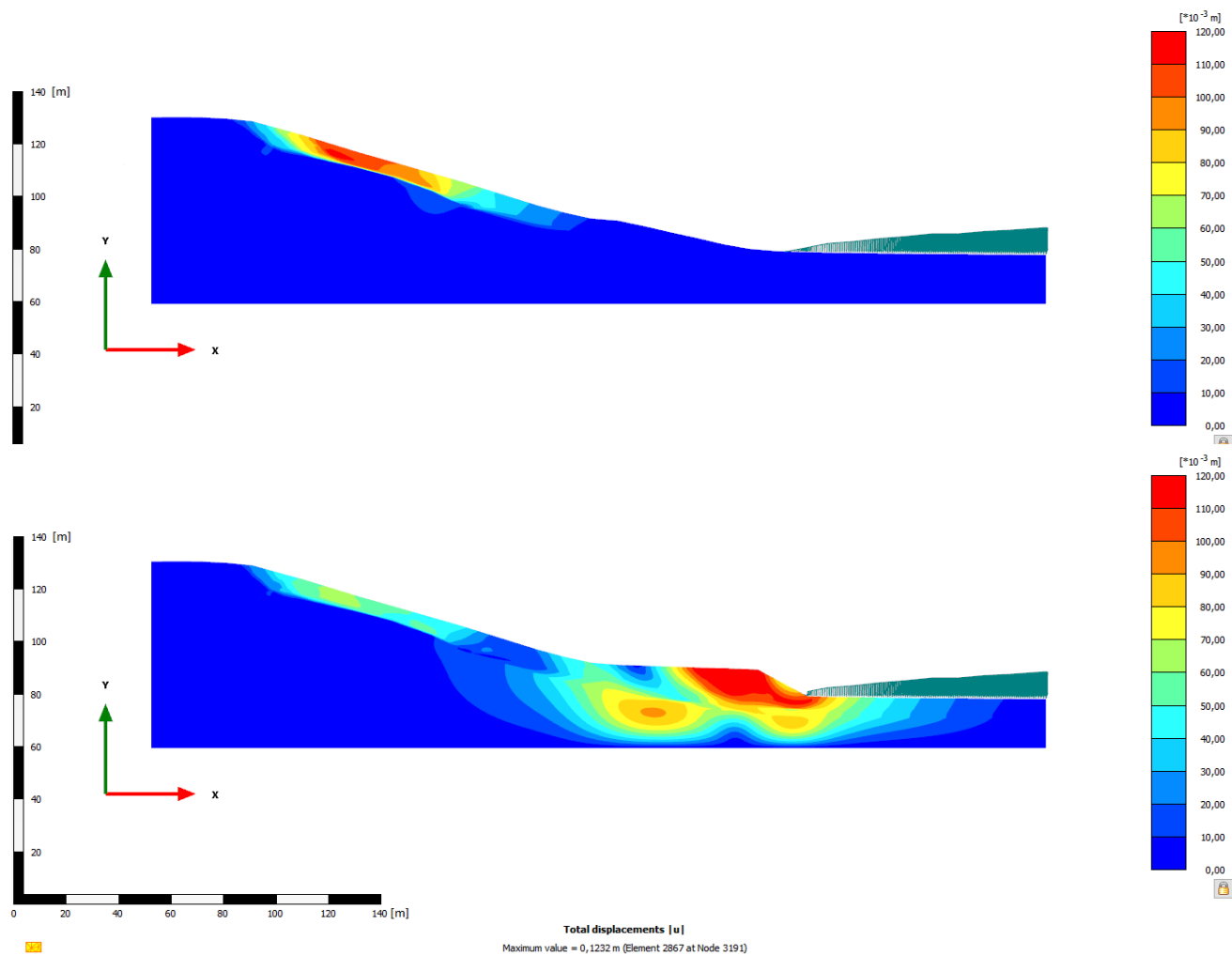


Legenda

	Jíl F6 (Neogén)
	Jíl F6
	Jíl písčité F4
	Jíl štěrkovitý F2
	Hlína F5
	Hlína jílovito-písčité F7
	Písek S1
	Písek jílovitý S5
	Písek hlinitý S4
	Štěrk G1
	Pískovec R3
	Materiál lavice Y
	HPV

VEDOUCÍ DP	VYPRACOVAL	KONZULTANT DP	<div><b>FAST</b></div> <div>FAKULTA STAVEBNÍ VŠB-TU OSTRAVA</div> <div>KATEDRA GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ</div> <div>FORMÁT</div> <div>DATUM</div> <div>OBOR</div> <div>ŠK.ROK</div> <div>MĚŘÍTKO</div> <div>Č. VÝKRESU</div>	
doc. RNDr. Pavel Pospíšil, PhD.	Bc. Marek Svárovský	Ing. Luďek Kovář, PhD.		
NÁZEV DIPLOMOVÉ PRÁCE				
ANALÝZA VÝVOJE SESUVU V OBLASTI KOZINEC U DOUBRAVY				
NÁZEV VÝKRESU				
GEOLOGICKÝ ŘEZ Č.2			1:1500	2

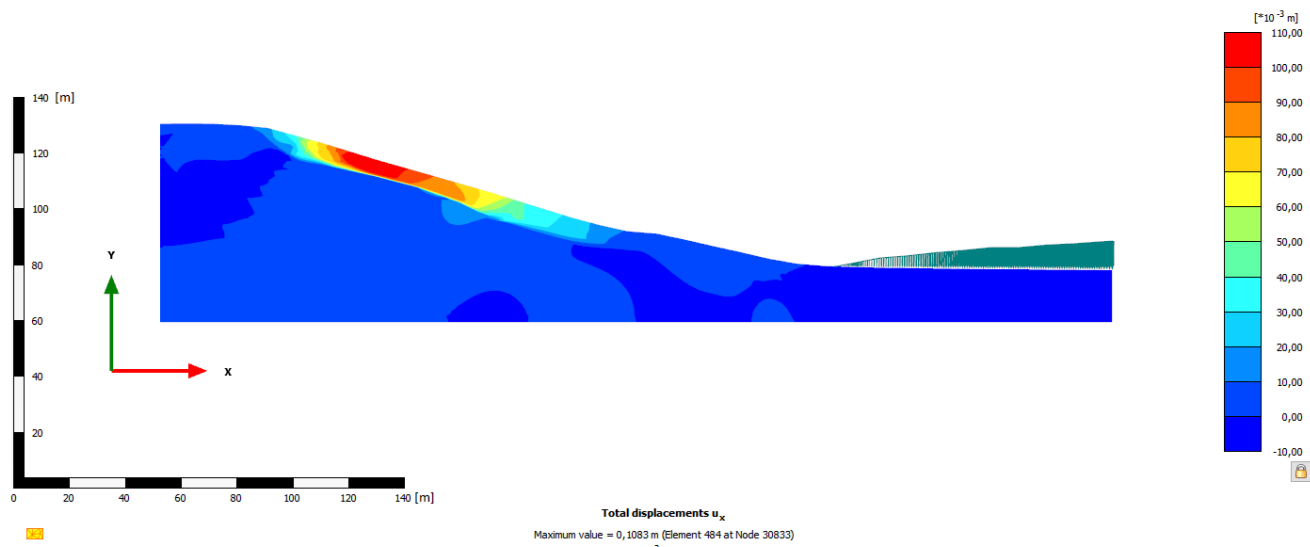
## Příloha č. 9: Absolutní posuny na profilu č. 2



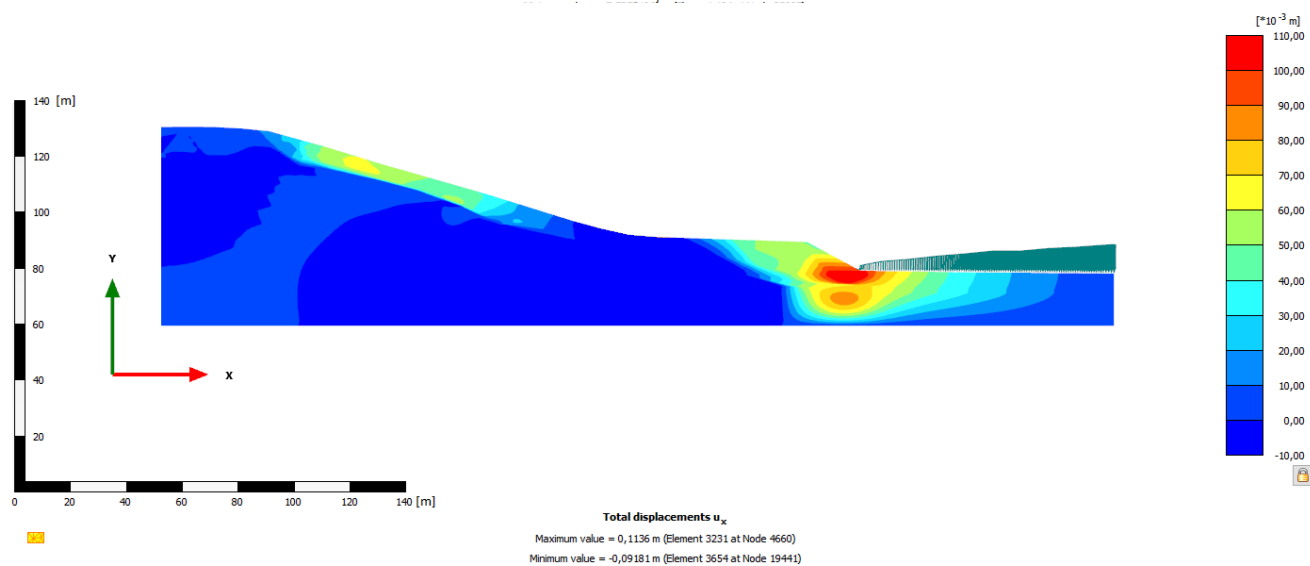
Posuny před sanací

Posuny po sanaci

## Příloha č. 10: Horizontální posuny na profilu č. 2

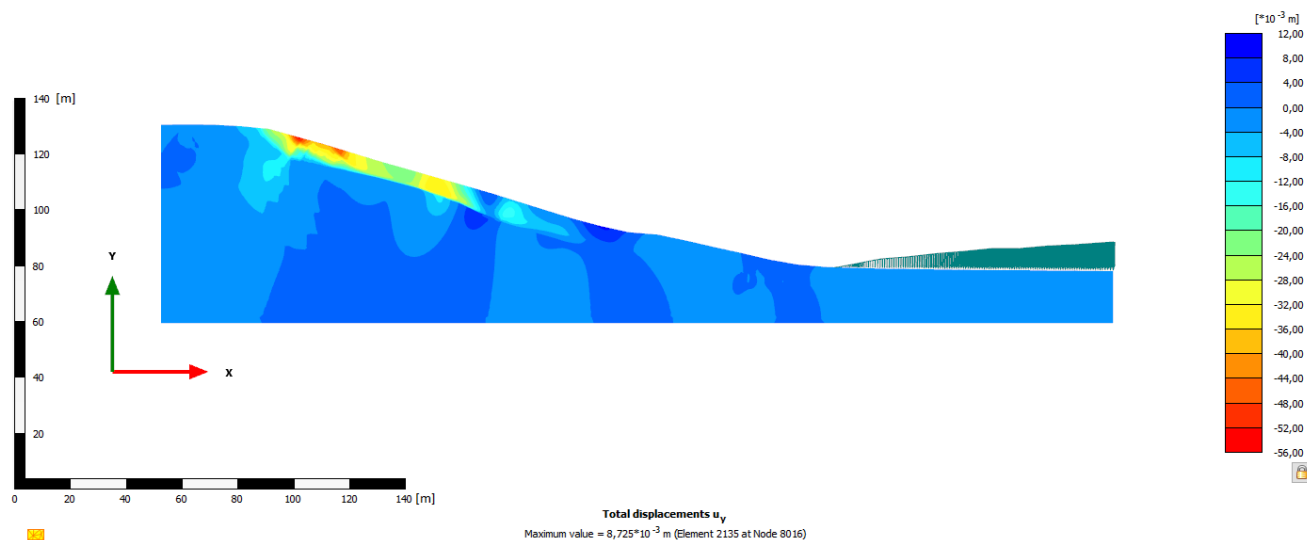


Posuny před sanací

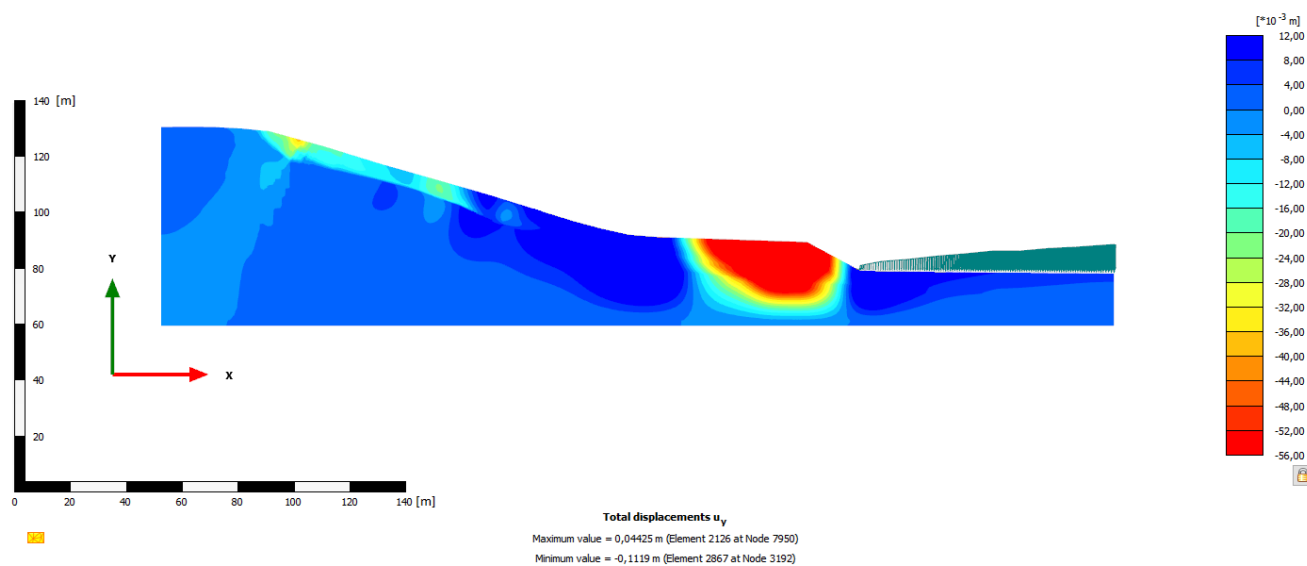


Posuny po sanaci

## Příloha č. 11: Vertikální posuny na profilu č. 2

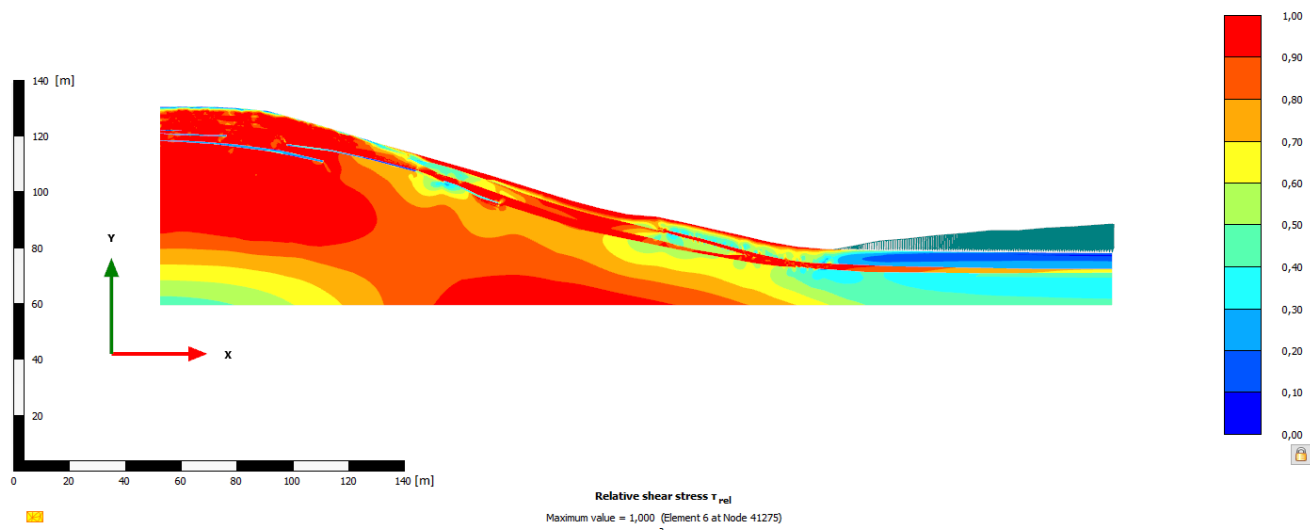


Posuny před sanací

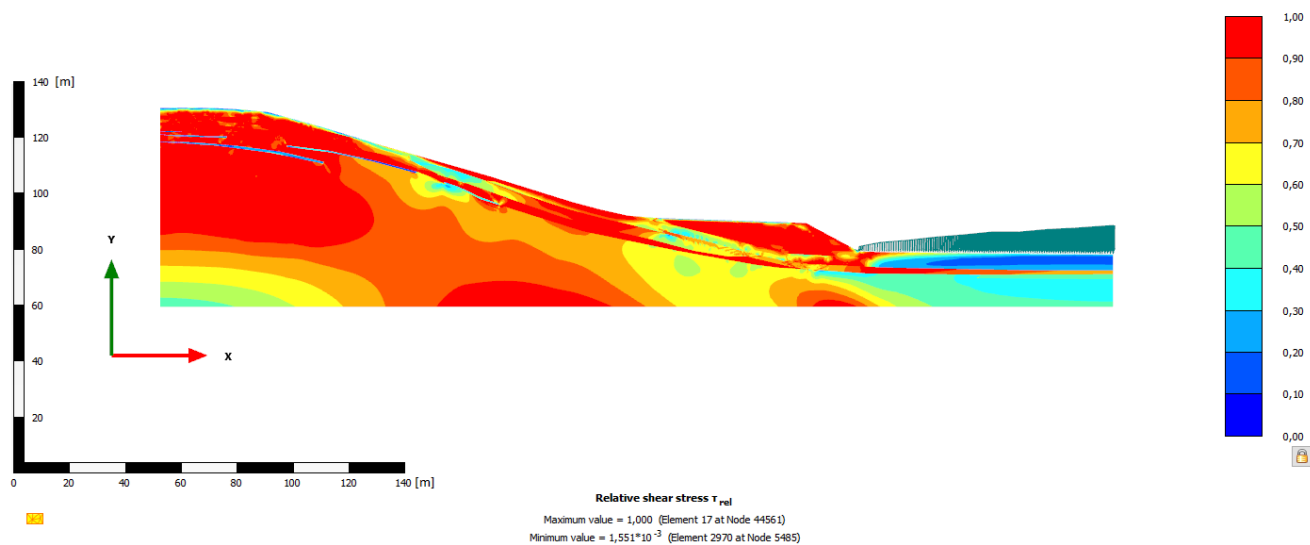


Posuny po sanaci

## Příloha č. 12: Čerpání smykové pevnosti na profilu č. 2



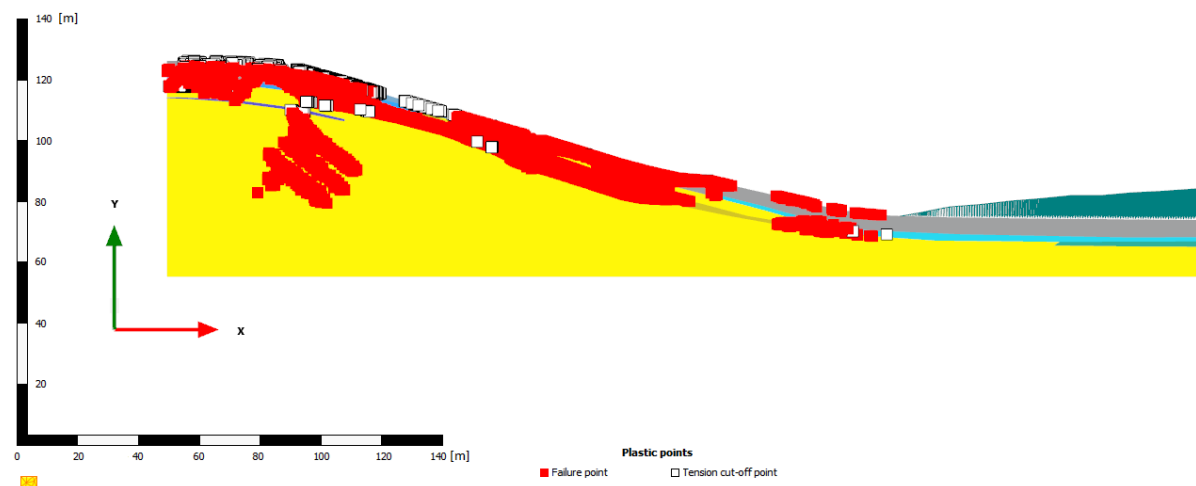
Čerpání pevnosti před sanací



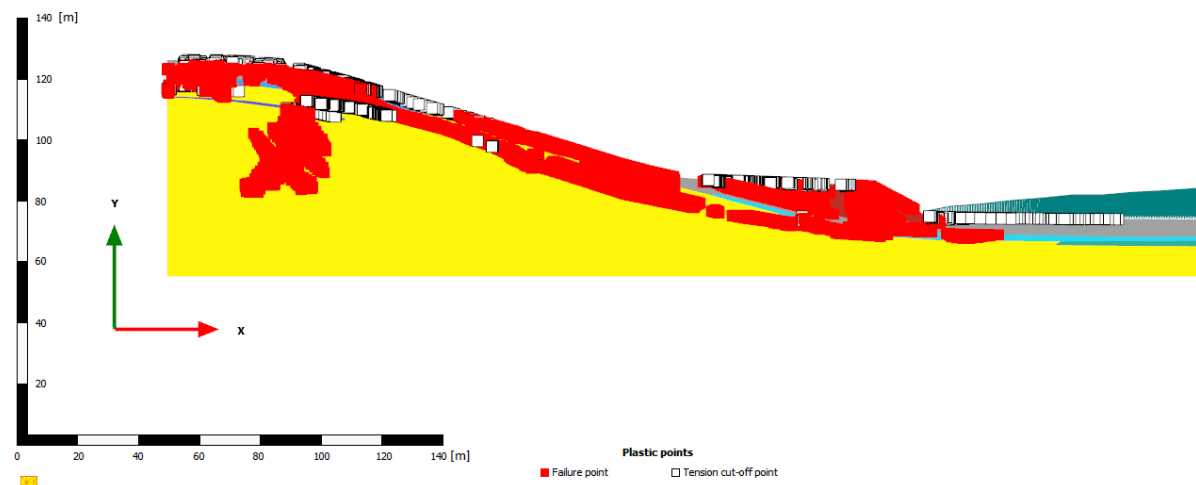
Čerpání pevnosti po sanaci



## Příloha č. 13: Plastické body a tahová porušení na profilu č. 2

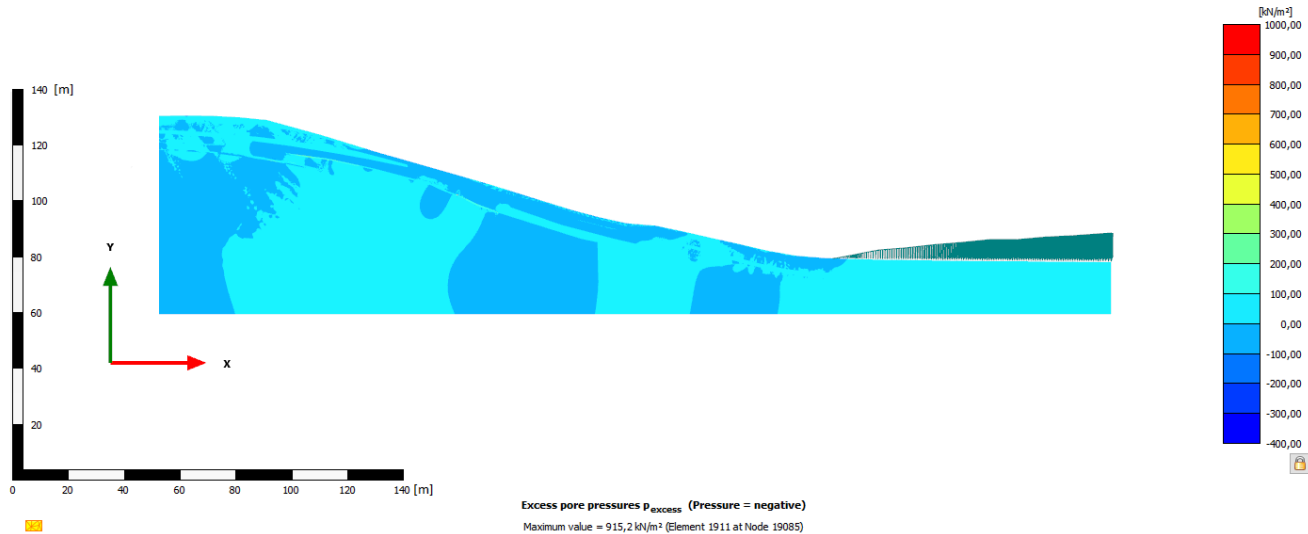


Body porušení před sanací

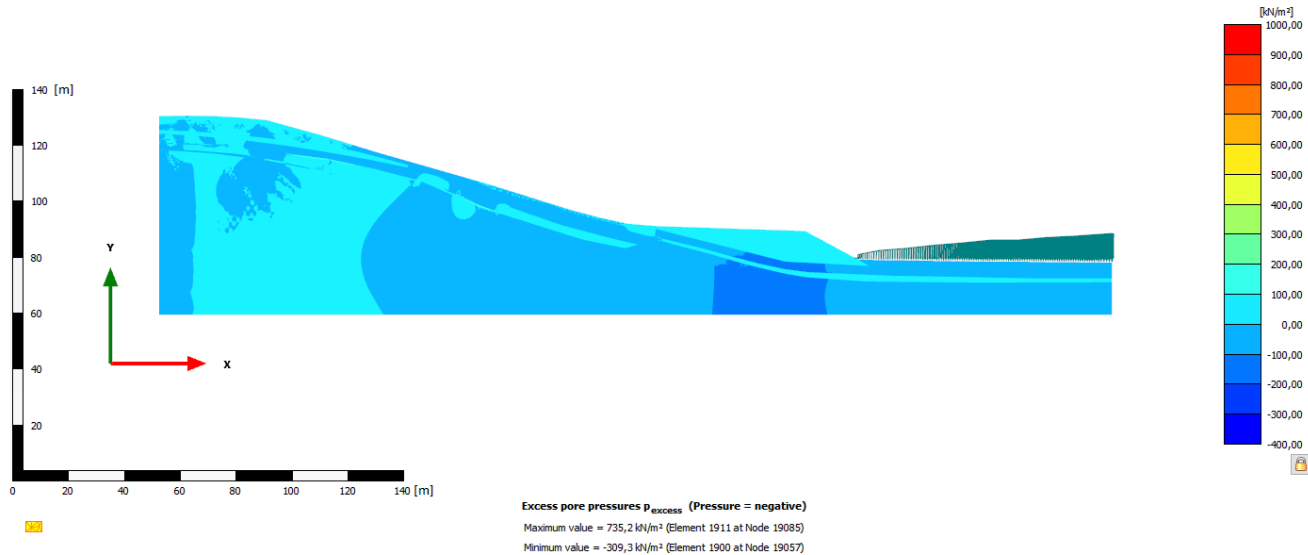


Body porušení po sanaci

Příloha č. 14: Pórové tlaky na profilu č. 2



Pórové tlaky před sanací



Pórové tlaky po sanaci



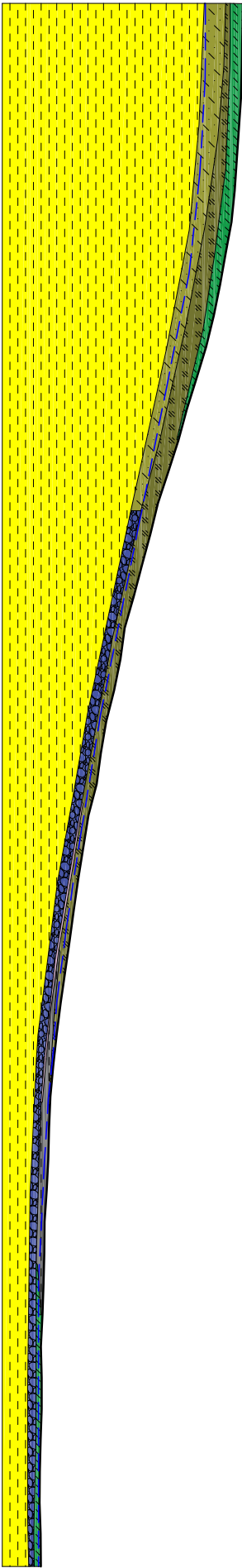
FAKULTA STAVEBNÍ  
VŠB-TU OSTRAVA

KATEDRA GEOTECHNIKY A  
PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

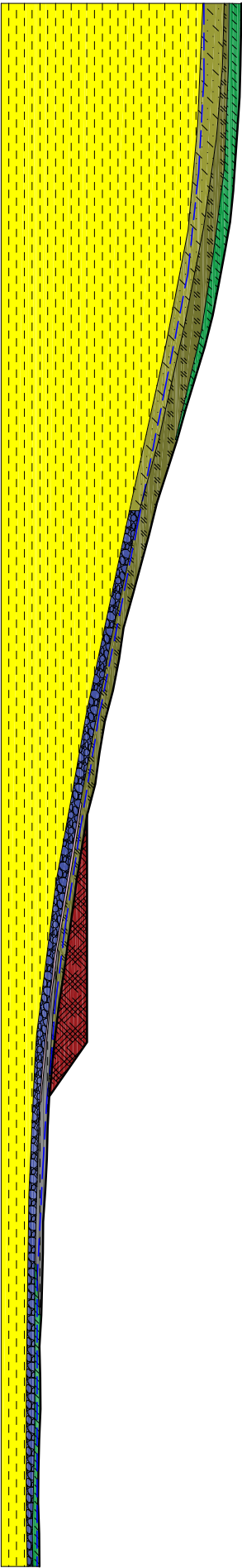
FORMÁT	A3
DATUM	LISTOPAD 2019
OBOR	GEOTECHNIKA
ŠK.ROK	2018/2019

MĚŘITKO	Č. VÝKRESU
1:2000	3

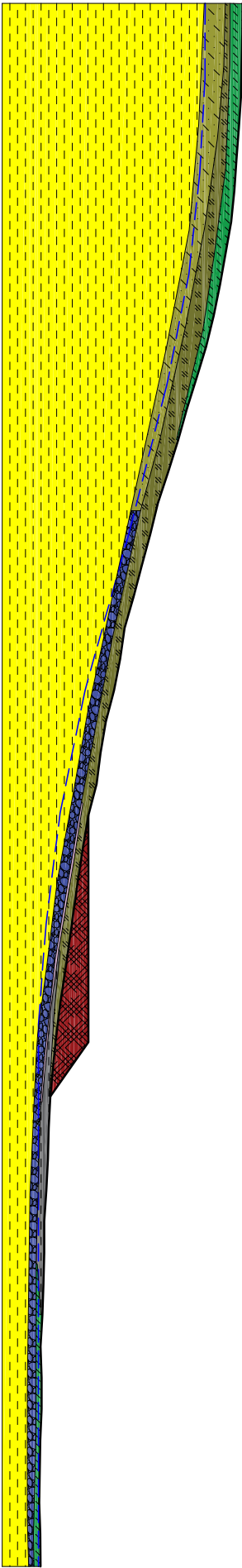
Profil 3, situace před sanací



Profil 3, situace s přetížením



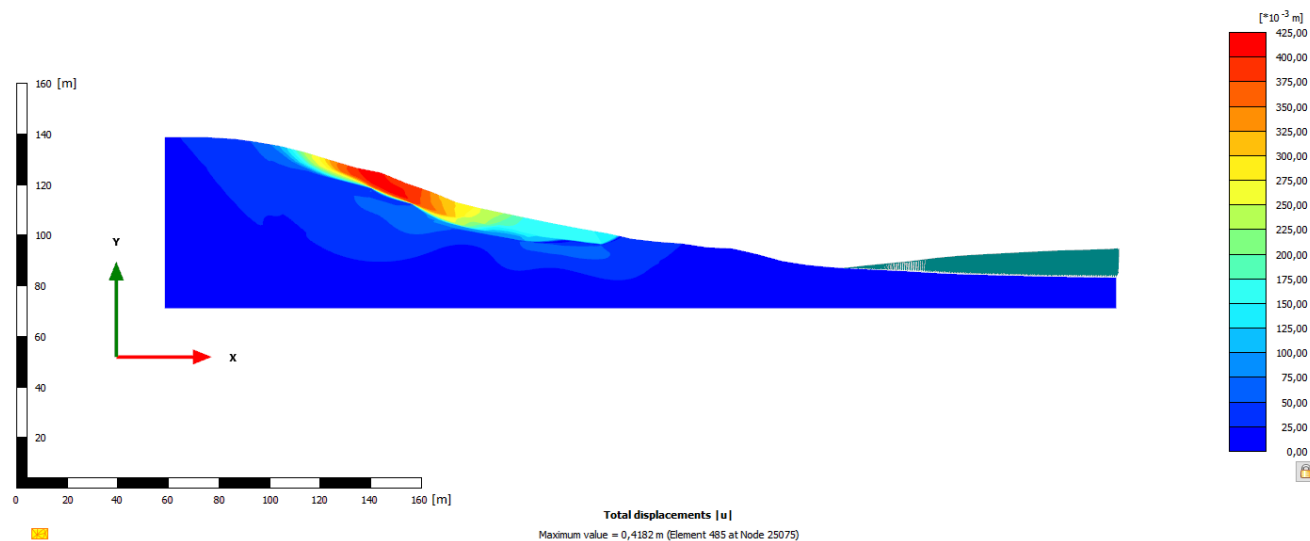
Profil 3, situace s přetížením i odvodněním



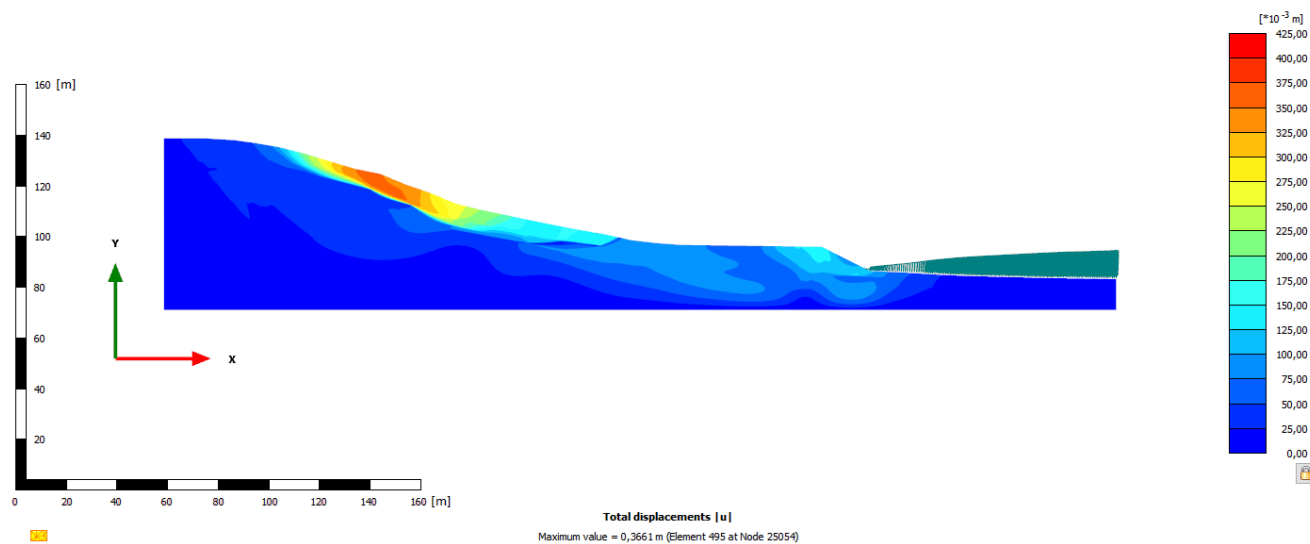
## Legenda

	Jíl F6 (Neogén)
	Jíl F6
	Jíl písčitý F4
	Jíl štěrkovitý F2
	Hlína F5
	Hlína jílovito-písčitá F7
	Písek S1
	Písek jílovitý S5
	Písek hlinitý S4
	Štěrka G1
	Pískovec R3
	Materiál lavice Y
	HPV

## Příloha č. 16: Absolutní posuny na profilu č. 3

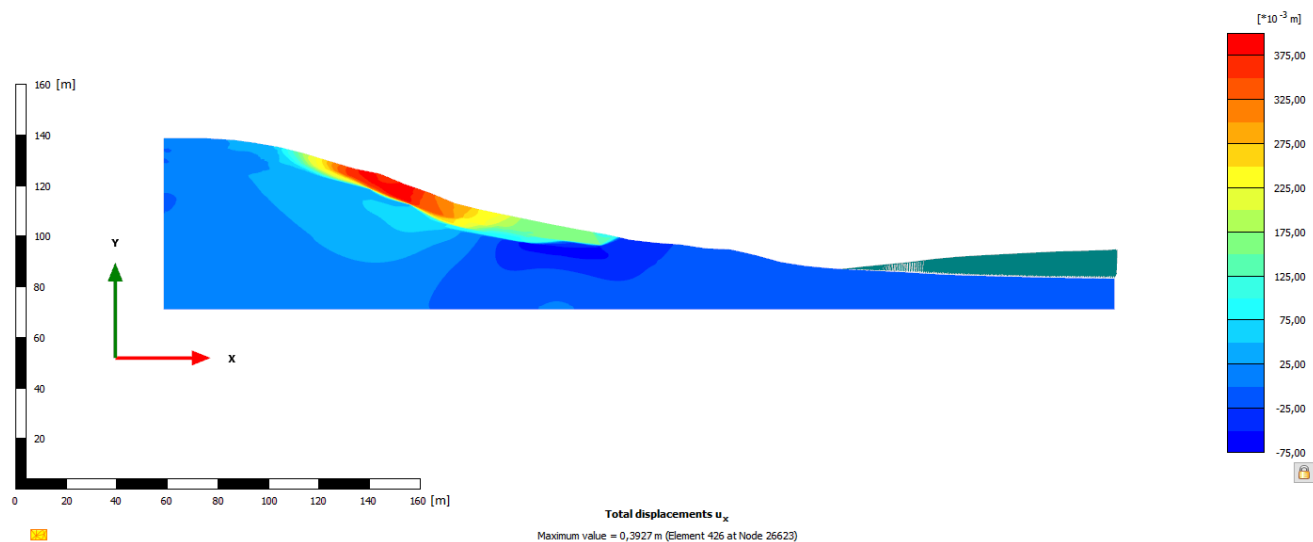


Posuny před sanací

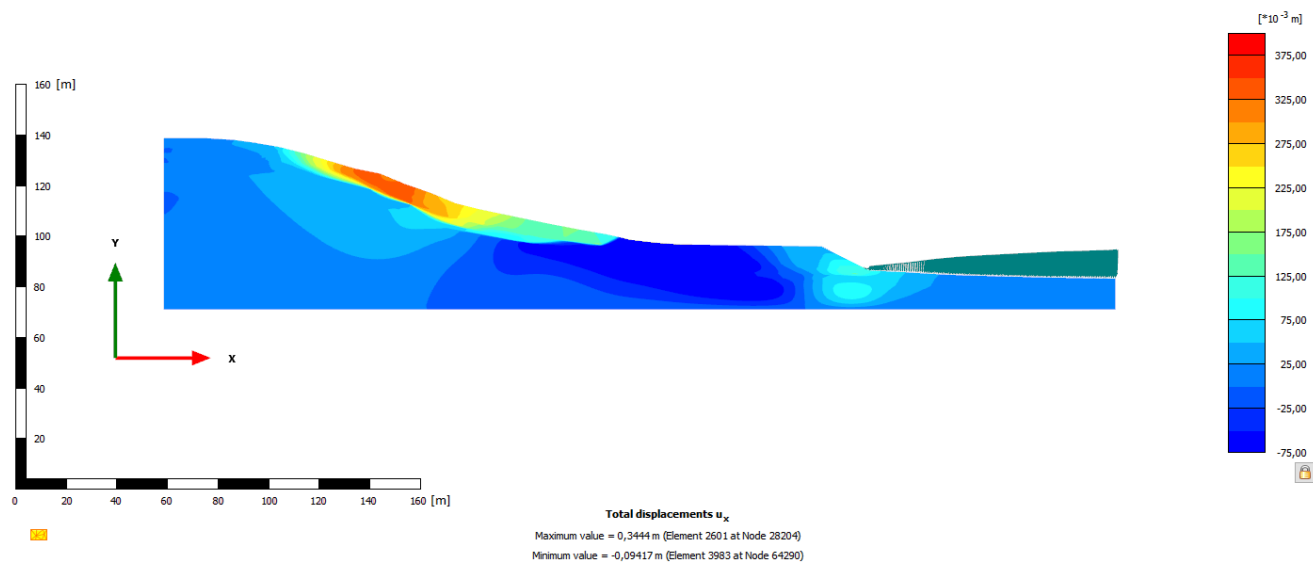


Posuny po sanaci

## Příloha č. 17: Horizontální posuny na profilu č. 3

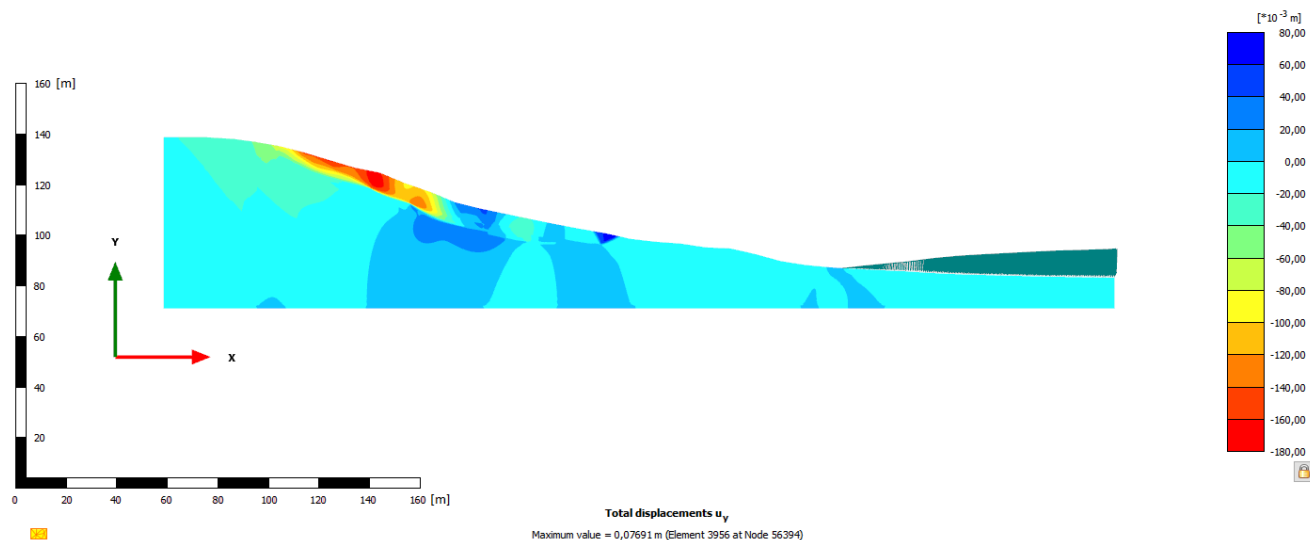


Posuny před sanací

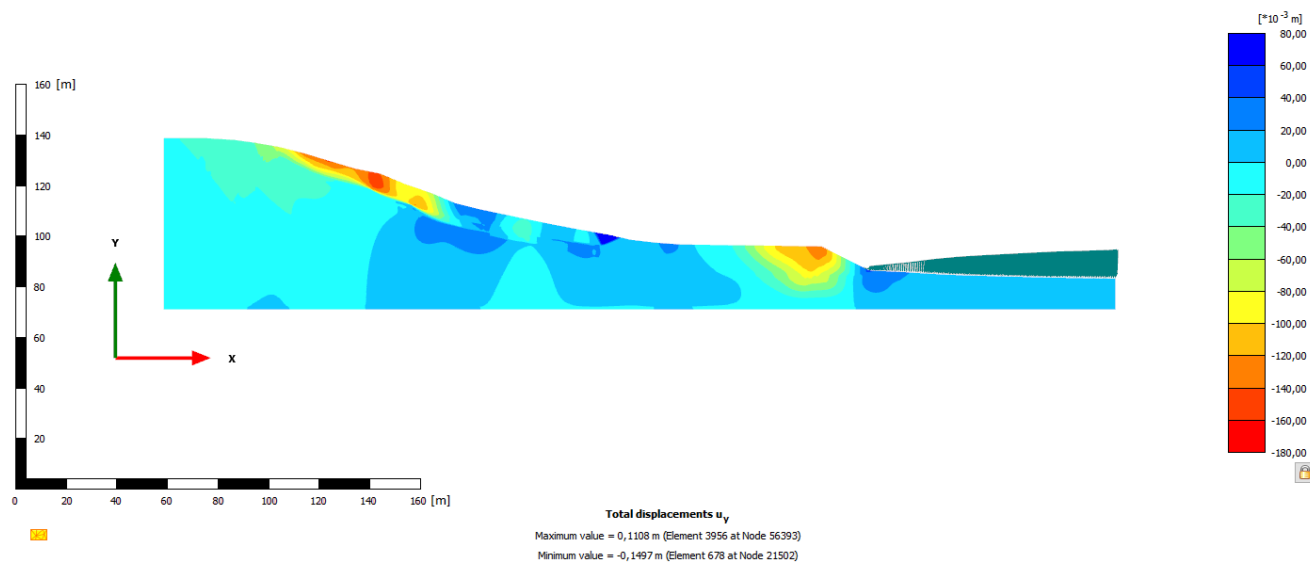


Posuny po sanaci

## Příloha č. 18: Vertikální posuny na profilu č. 3

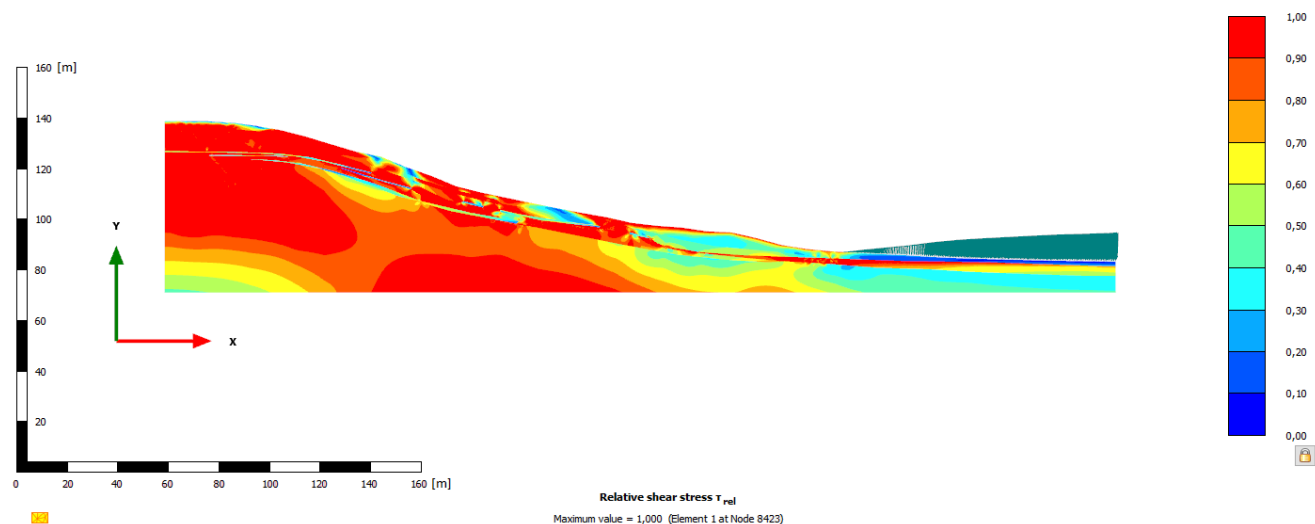


Posuny před sanací

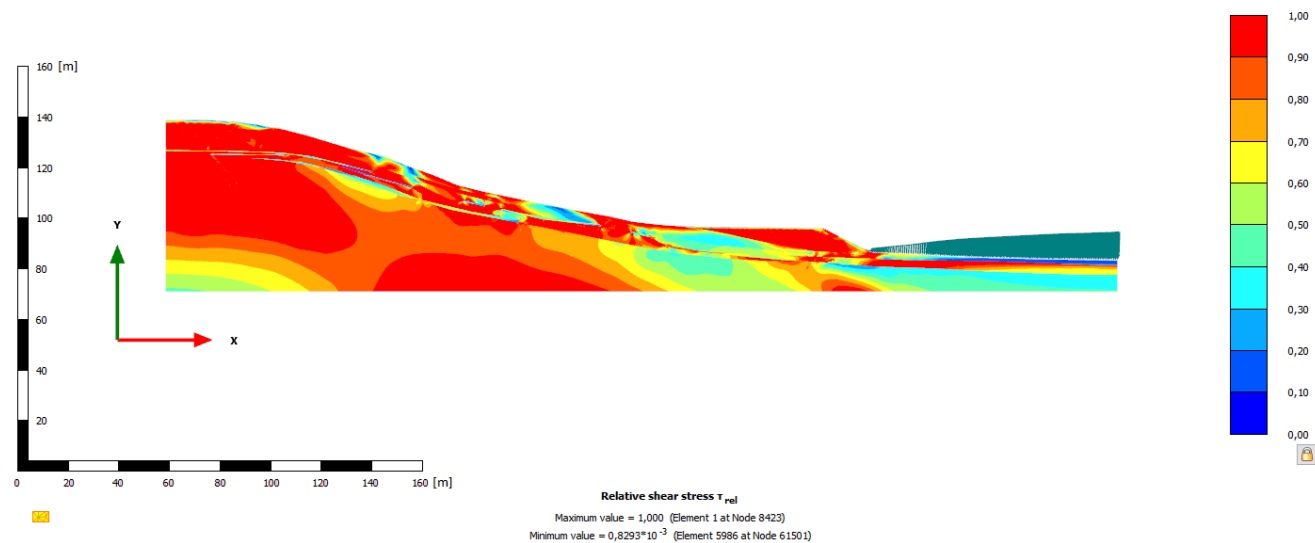


Posuny po sanaci

## Příloha č. 19: Čerpání smykové pevnosti na profilu č. 3

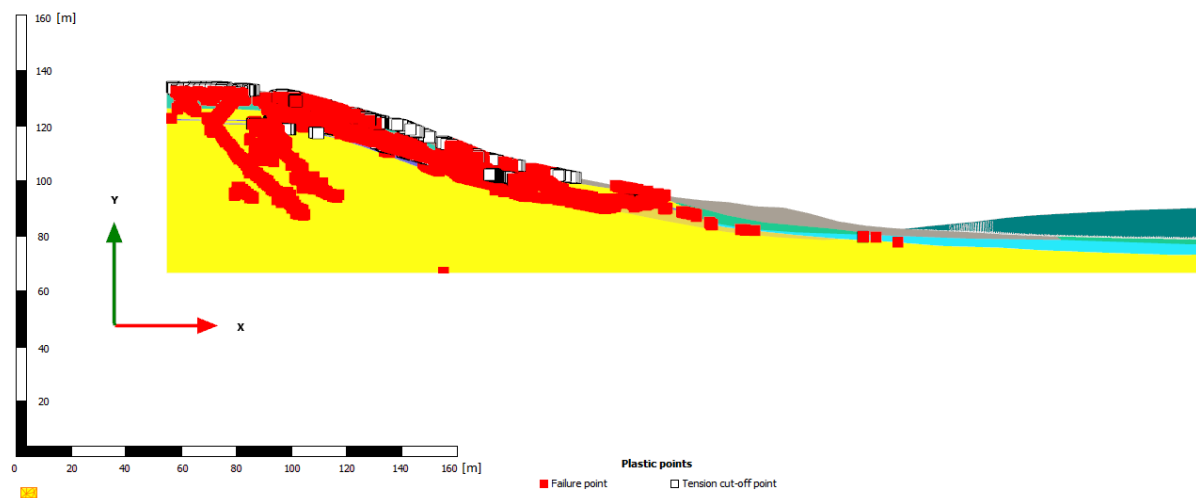


Čerpání pevnosti před sanací

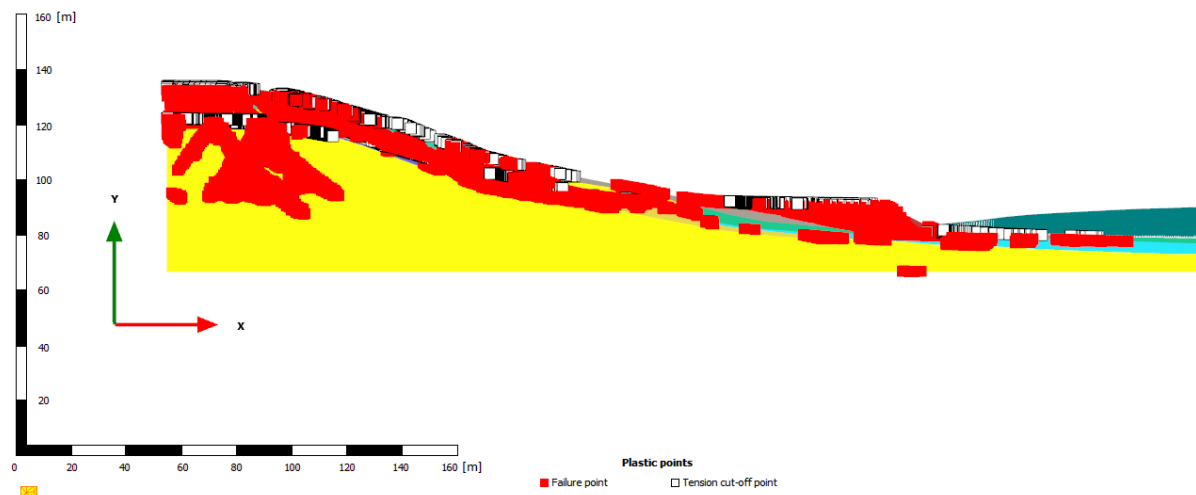


Čerpání pevnosti po sanaci

## Příloha č. 20: Plastické body a tahová porušení na profilu č. 3



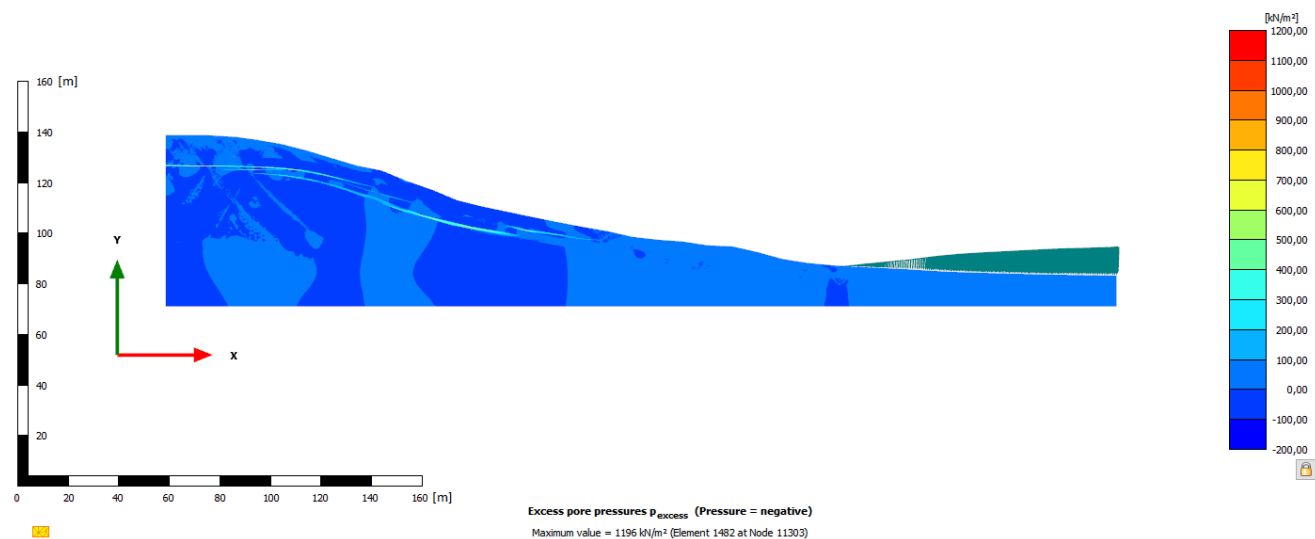
Body porušení před sanací



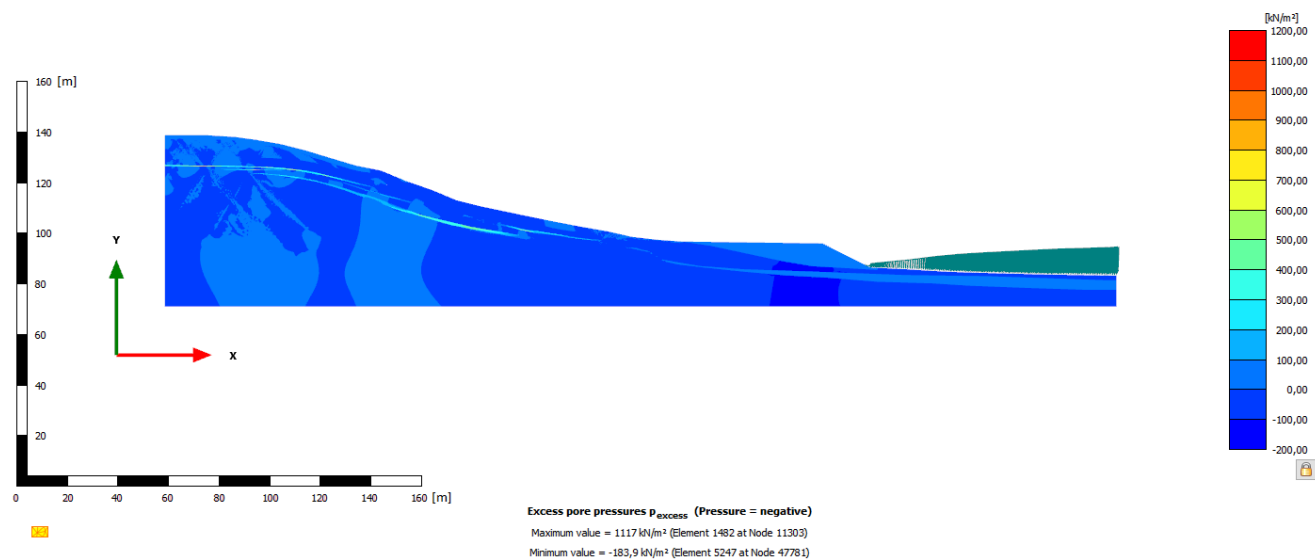
Body porušení po sanaci



## Příloha č. 21: Pórové tlaky na profilu č. 3



Pórové tlaky před sanací



Pórové tlaky po sanaci